

VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ - TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA

Hornicko-geologická fakulta

Institut geologického inženýrství

**Problematika navyšování uskladňovacích kapacit podzemních zásobníků
plynu**

Problems of Capacity Increase of Underground Gas Storage

Diplomová práce

Autor: Bc. Lucie Bělíčková

Vedoucí diplomové práce: prof. Ing. Petr Bujok, CSc.

Ostrava 2013

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Hornicko-geologická fakulta
Institut geologického inženýrství

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Lucie Bělíčková**
Studijní program: N2110 Geologické inženýrství
Studijní obor: 2101T003 Geologické inženýrství
Téma: **Problematika navyšování uskladňovacích kapacit podzemních zásobníků plynu**
Problems of Capacity Increase of Underground Gas Storage

Zásady pro vypracování:

1. Přehled podzemních zásobníků v ČR
2. Současný stav a perspektivy podzemního uskladňování plynů v ČR a ve světě
3. Možnosti rozšiřování uskladňovacích kapacit PZP
4. Problematika výzkumu těsnosti nadložních vrstev
5. Laboratorní výzkum propustnosti horninových vzorků
6. Závěr

Seznam doporučené odborné literatury:

Dle pokynů vedoucího diplomové práce.

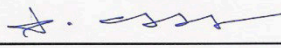
Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

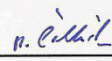
Vedoucí diplomové práce: **prof. Ing. Petr Bujok, CSc.**

Datum zadání: 31.10.2012

Datum odevzdání: 30.04.2013




doc. Ing. Radomír Grygar, CSc.
vedoucí institutu


prof. Ing. Vladimír Slivka, CSc., dr.h.c.
děkan fakulty

Prohlášení

- Celou diplomovou práci včetně příloh, jsem vypracovala samostatně a uvedla jsem všechny použité podklady a literaturu.
- Byla jsem seznámena s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č.121/2000 Sb. - autorský zákon, zejména § 35 – využití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a využití díla školního a § 60 – školní dílo.
- Beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně, ke své vnitřní potřebě, diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- Souhlasím s tím, že jeden výtisk diplomové práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB-TUO k prezenčnímu nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o diplomové práci, obsažené v Záznamu o závěrečné práci, umístěném v příloze mé diplomové práce, budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- Souhlasím s tím, že diplomová práce je licencována pod Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 3.0 Unported licencí. Pro zobrazení kopie této licence, je možno navštívit <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/>
- Bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu o komerční využití z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- Bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu komerčnímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).

V Ostravě dne

.....

Lucie Bělíčková

Anotace

Tato diplomová práce se zabývá problematikou navyšování kapacity a výkonových parametrů podzemních zásobníků plynu. Skládá se z pěti částí. V první části je zpracován zemní plyn a jeho podzemní uskladňování. Druhá část se týká podzemních zásobníků plynu v České republice. Třetí část se zabývá samotnou problematikou navyšování kapacity zásobníků. Ve čtvrté části je zpracován přehled současné metodiky měření prahových kapilárních tlaků a poslední, pátá část je věnována experimentálnímu měření.

Klíčová slova: zemní plyn, podzemní zásobník plynu, kapilární jevy, pórovitost, propustnost, prahový kapilární tlak

Abstract

This thesis deals with the problems of capacity increase of underground gas storage. It consists of five parts. The first part is processed natural gas and underground storage. The second part relates to underground gas storages in the Czech Republic. The third part discusses the issue of increasing capacity. The fourth part is about nowadays method related to measurement of threshold capillary pressure and the last, fifth part is devoted to experimental measurements.

Keywords: natural gas, underground gas storage, capillary effects, porosity, permeability, threshold capillary pressure

Ráda bych poděkovala vedoucímu mé diplomové práce, prof. Ing. Petru Bujokovi, CSc. za cenné rady a připomínky. Dále děkuji Ing. Jánů Pavlušovi, Ing. Michalu Porzerovi a Ing. Martinu Klempovi za pomoc při experimentálním měření v Laboratoři simulace vrtů a ložisek.

Obsah

1. Úvod	1
2. Zemní plyn.....	2
2.1 Podzemní uskladňování	2
2.2 Základní parametry PZP	7
2.3 Režimy práce PZP	8
2.4 Části PZP	9
2.4.1 Podzemní část	9
2.4.2 Povrchová technologie	10
3. Podzemní zásobníky plynu v ČR.....	11
3.1 Dolní Dunajovice.....	11
3.2 Háje.....	12
3.3 Lobodice	15
3.4 Štramberk.....	16
3.5 Třanovice	17
3.6 Tvrdonice.....	18
3.7 Dolní Bojanovice	20
3.8 Uhřice	20
4. Problematika navyšování kapacity a výkonových parametrů PZP	21
4.1 Projekt navýšení kapacity na PZP Třanovice	21
4.2 Vlastnosti uskladňovací vrstvy	23
4.3 Smáčivost.....	24
4.4 Kapilarita	25
4.5 Propustnost	28

4.6 Pórovitost.....	29
4.6.1 Efektivní pórovitost	29
4.7 Určení nejvyššího provozního tlaku	31
5. Současná metodika měření prahových kapilárních tlaků	32
6. Experimentální měření	35
6.1 Měření pórovitosti a permeability	36
6.1.1 Stanovení pórovitosti.....	36
6.1.2 Stanovení permeability	37
6.2 Vlastní laboratorní měření	38
6.2.1 Postup měření	38
6.3 Stanovení fyzikálně – petrografických parametrů vzorku č.1	39
6.3.1 Stanovení hysterezních křivek jádra č. 1	39
6.4 Stanovení fyzikálně – petrografických parametrů vzorku č. 2	46
6.4.1 Stanovení hysterezních křivek jádra č. 2	46
6.5 Stanovení fyzikálně – petrografických parametrů vzorku č. 3	54
6.5.1 Stanovení hysterezních křivek jádra č.3	54
6.6 Stanovení permeability vzorku č.1	61
6.7 Stanovení permeability vzorku č.2	62
6.8 Stanovení permeability vzorku č. 3	63
6.9 Měření prahového kapilárního tlaku.....	64
6.9.1 Stanovení prahového kapilárního tlaku vzorků	65
7. Závěr.....	66

1. Úvod

V současné době je zemní plyn a jeho podzemní uskladňování velmi skloňovaným tématem. Na rozdíl od jiných energetických zdrojů, zemní plyn ve velkém množství nemůže být koncovými spotřebiteli skladován. Jedinou možností jsou tak podzemní zásobníky plynu. Svou kapacitou mohou zajistit bezpečnost dodávek zemního plynu v případě přerušení zásobování plynovody ze zahraničí.

Abychom mohli určit možné prostory pro podzemní uskladňování plynu, je potřeba stanovit fyzikálně – petrografické parametry důležité pro odhad uskladňovacích možností, a to těsnicí parametry nadloží vrstev a vlastnosti dané zásobníkové struktury.

Mezi základní parametry nutné pro poznání vlastností hornin zásobníku patří objem pórů, pórovitost, hustota horninového prostředí a permeabilita a jejich změny při různém tlakovém působení.

Cílem této práce bylo zjištění základních fyzikálně – petrografických parametrů horninových vzorků vhodných pro uskladňování zemního plynu a stanovení hodnoty jejich prahového kapilárního tlaku. Plynotěsnost těsnicího nadloží je založena na existenci kapilárních jevů. Průnik plynů do pórů velmi malých průměrů vyžaduje vyšší tlak než je tlak vody v těsnicím nadloží. Tento navýšený tlak se nazývá **kapilární prahový tlak** a je limitní hodnotou pro skladovací provozní tlak. Aby mohlo dojít k navýšení skladovací kapacity podzemních zásobníků plynu, je třeba znát hodnotu prahového kapilárního tlaku.

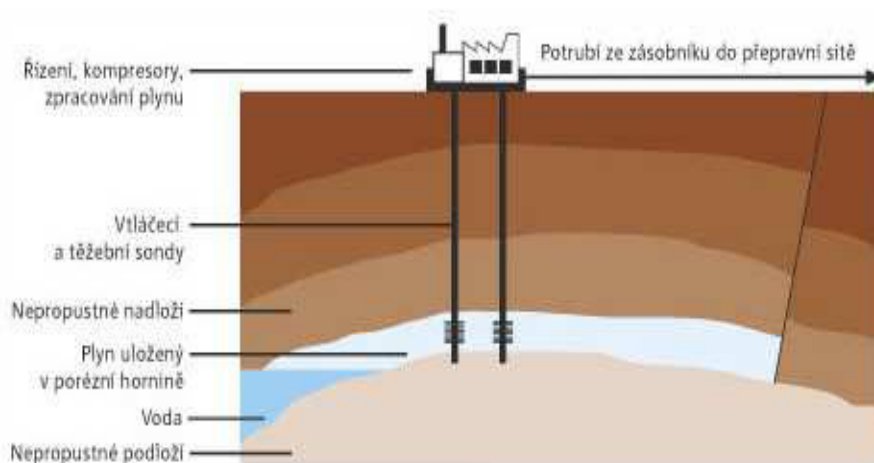
2. Zemní plyn

Zemní plyn je přírodní směsí plyných uhlovodíků (převažuje podíl methanu CH_4) a nehořlavých složek (hlavně dusíku N_2 a oxidu uhličitého CO_2). Jedná se o bezbarvý, nezapáchající, nejedovatý a hořlavý plyn. Na vznik plynu existují 2 teorie: podle organické teorie se plyn postupně uvolňoval při vzniku uhlí nebo ropy v důsledku postupného rozkladu organického materiálu. Podle anorganické teorie vznikl plyn řadou chemických reakcí z anorganických látek.

2.1 Podzemní uskladňování

Důležitou součástí plynárenského systému jsou podzemní zásobníky plynu (PZP) (viz obr.1). Dodávky zemního plynu od producentů kolísají v průběhu roku nepatrně. Dálkové plynovody jsou dimenzovány tak, aby byly z ekonomických důvodů vytíženy rovnoměrně po celý rok.

Podzemní zásobníky jsou veškerá podpovrchová a povrchová zařízení nutná pro skladování. Pro skladování zemního plynu se využívají přírodní nebo umělé prostory v podzemních geologických souvrstvích.

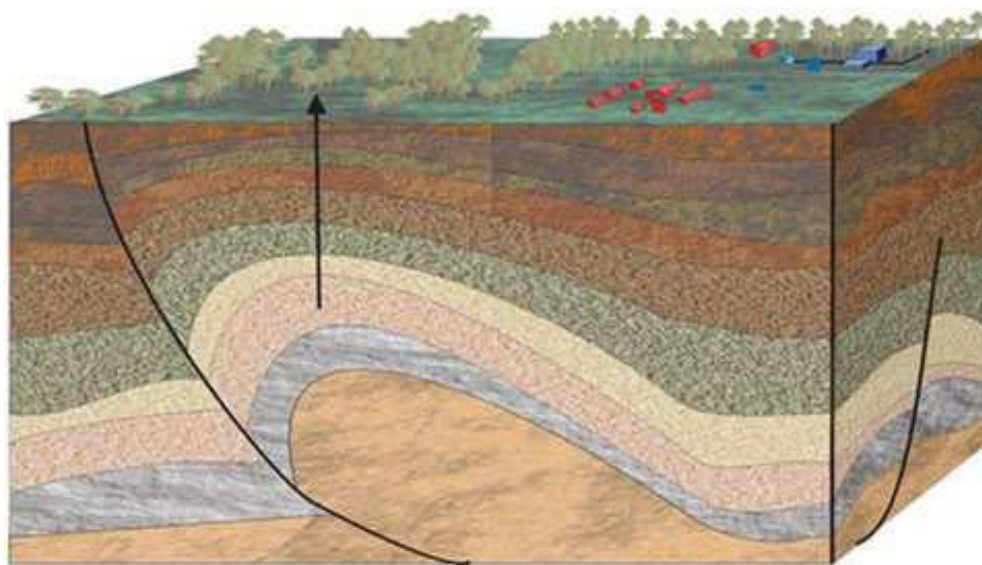


Obrázek 1 - Podzemní zásobník plynu [27]

Podzemní zásobníky zemního plynu se rozdělují do dvou základních typů:

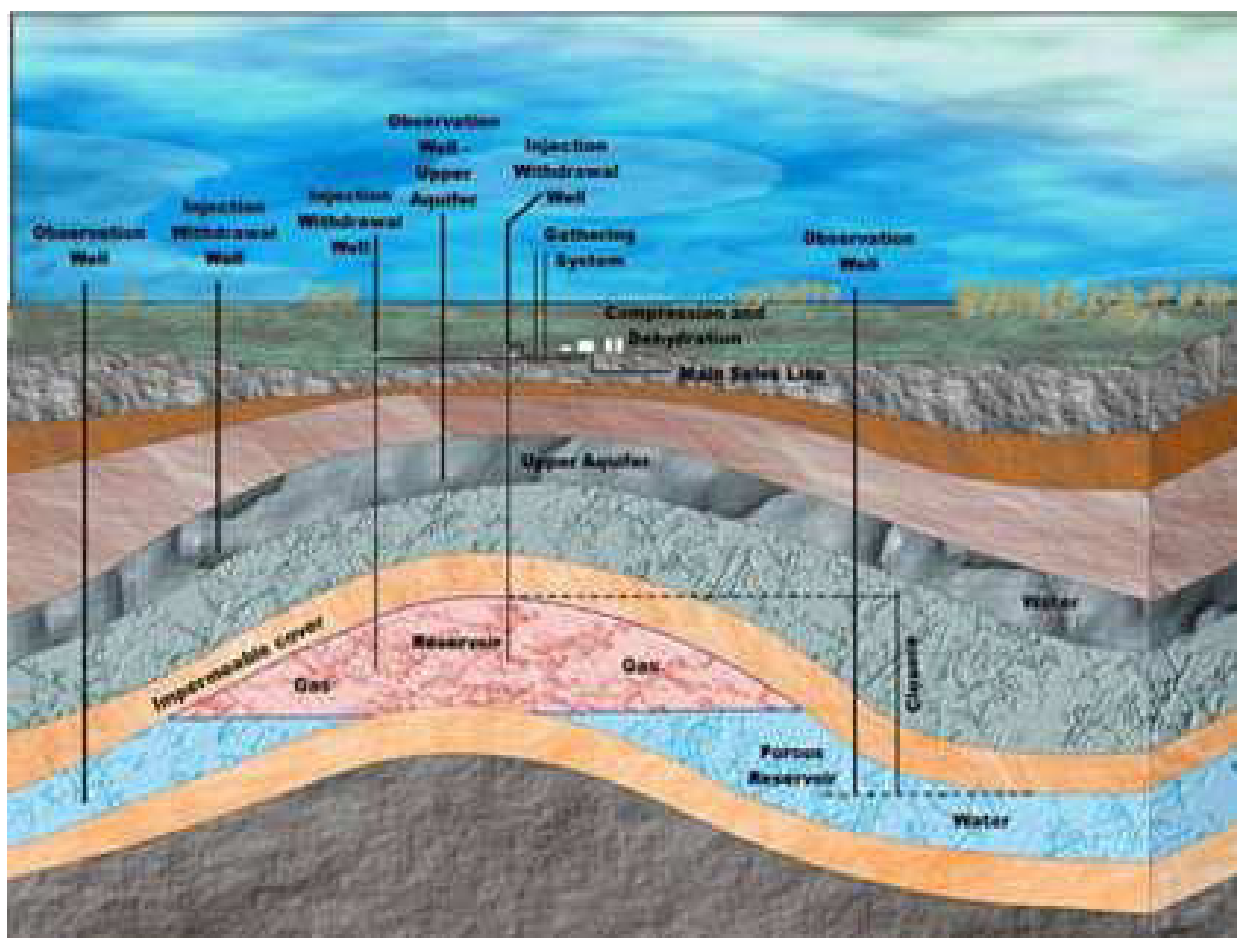
1. Porézní zásobníky

Jedná se většinou o vytěžená ložiska ropy nebo zemního plynu, kde se plyn skladuje v drobných pórech a trhlinách v pevných, ale porézních a propustných horninách (obr.2). Místo v ložisku, které se uvolnilo vytěžením ropy nebo zemního plynu je tak možné využít pro skladování plynu.



Obrázek 2 - Podzemní zásobník plynu - typ porézní [15]

Méně častým typem porézních zásobníků jsou aquifery (obr. 3). Jedná se o horniny, které plní roli přirozených vodních rezervoárů, vhodných pro uskladňování plynu. Umělým odtlačení vody do nižších úrovní vodonosné vrstvy vznikne prostor pro uskladňování.

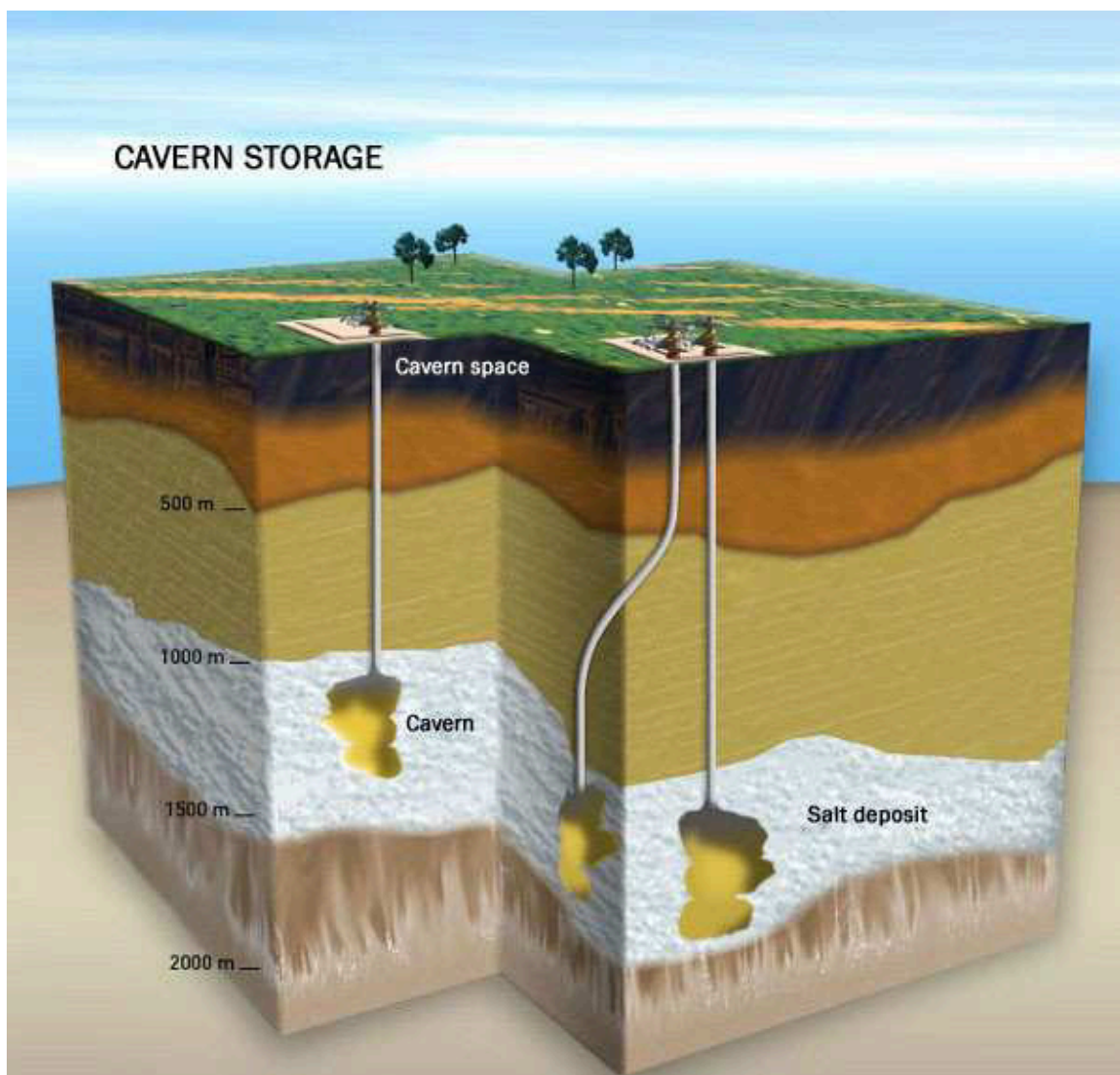


Obrázek 3 - Podzemní zásobník plynu - typ aquifer [15]

Legenda: Gas – plyn, Water – voda, Reservoir – zásobník, Porous reservoir – porézní zásobník, Impermeable cover – nepropustná vrstva, Upper aquifer – svrchní zvodnělá vrstva, Observation well – pozorovací vrt, Compression and dehydration – komprese a dehydratace, Injection withdrawal well – vtláčeň – odběrové sond, Gathering system – sběrné středisko, Main sales line – doprava plynu

2. Kavernové zásobníky

Kavernové zásobníky jsou dutiny, které byly uměle vytvořeny. Jedná se o solné kaverny nebo o opuštěné uhelné či jiné doly, případně o prostory vytvořené přímo pro uskladňování plynu (obr. 4). Výhodou těchto zásobníků je snadné řízení toku plynu a jejich vysoký vtláčecí a těžební výkon.



Obrázek 4 - Podzemní zásobník plynu - typ kaverna [18]

Legenda: cavern – kaverna, cavern storage – kavernový zásobník, salt deposit – ložisko soli,

Podzemní zásobníky můžeme rozdělit podle způsobu jejich využívání na **zásobníky, které se plní** se v průběhu léta, během zimních měsíců je z nich dodáván plyn do sítě. Mají velkou uskladňovací kapacitu, ale menší denní výkon. Pro jejich výstavbu se využívají hlavně vytěžená plynová nebo ropná ložiska, výjimečně i tzv. aquifery. Jedná se o podzemní porézní horninové vrstvy s dostatečnou propustností, kdy v prvním případě byly tyto vrstvy původně zaplněny plynem nebo ropou, v druhém případě vodou.

Dalším typem jsou **zásobníky, které slouží k pokrytí** spotřeby zemního plynu v obdobích, kdy je nutné do sítě dodat velké množství plynu v krátkém časovém období.

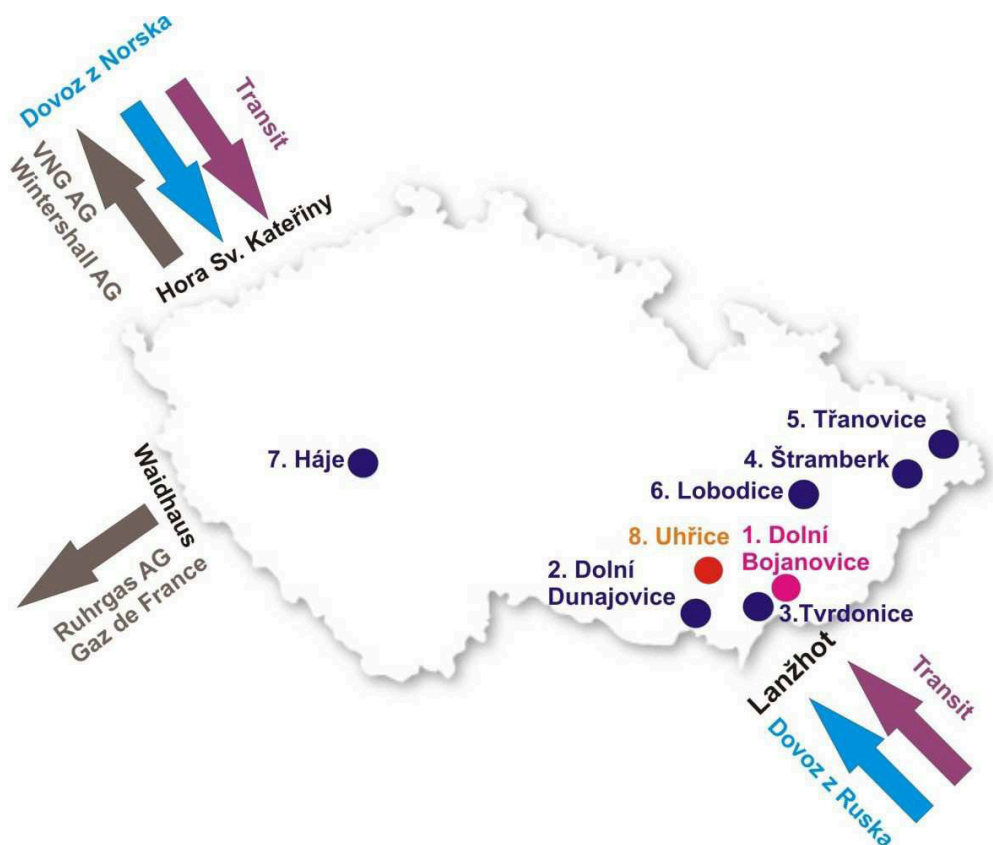
Nejčastěji se zásobníky zřizují v solných kavernách (dutinách), které vzniknou vyloužením části solného ložiska vodou, méně často se k tomuto účelu využívají jiné podzemní dutiny, jako opuštěné uhelné, rudné doly nebo uměle vyrubaná kaverna.

Plynárenství České republiky bylo po dlouhou dobu budováno jako jeden celek. K 1. lednu 1994 však došlo k rozdělení Českého plynárenského podniku na Transgas a regionální distribuční společnosti.

RWE Transgas, a.s. zajišťuje přepravu zemního plynu přes území České republiky a nákup zemního plynu pro potřeby České republiky, zásobování jednotlivých regionů dálkovodním systémem a podzemní uskladňování zemního plynu.

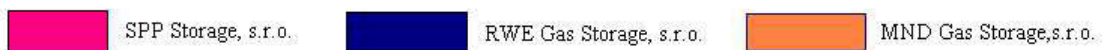
Dalšími společnostmi, které v České republice provozují podzemní zásobníky plynu, jsou SPP Storage s.r.o a MND Gas Storage.

V České republice je dnes celkem **8 zásobníků** na jižní a severní Moravě vytvořených v porézním prostředí, z toho 1 je aquiferového typu – v Lobodících. V Tvrdomicích se pouze v případě 9. – 11. obzoru jedná o aquifer. Ostatní PZP jsou vytvořeny v bývalých nalezištích zemního plynu, příp. ropo-plynových (obr. 5).



Obrázek 5 - Mapa podzemních zásobníků plynu v ČR [20]

Legenda:



2.2 Základní parametry PZP

a) Aktivní náplň (provozní zásoby)

Objem plynu, který je možné během těžební sezóny ze zásobníku odebrat, aniž by se porušila dlouhodobá hydrodynamická stabilita ložiska.

b) Pasivní náplň (poduška)

Zabezpečuje dostatečný tlak na konci odběrového období pro zajištění požadovaných výkonů.

Udrží filtrační vlastnosti kolektorské horniny.

Zabraňuje nástupu vodního zápolí do plynové části obzoru.

c) Pohotový výkon

Jedná se o maximální množství plynu, které je možné odebrat ze zásobníku v průběhu 24 hod.

Pohotový výkon každého PZP charakterizuje tzv. výkonová křivka, která se rovná sumě výkonů jednotlivých provozních sond omezených hodnotou propustnosti technologického zařízení PZP.

d) Rozsah provozních tlaků

Jedná se o interval ložiskových tlaků mezi P_{\max} a P_{\min} .

e) Počet vtlačně – odběrových sond

Sondy se lokalizují do částí ložiska s příznivými kolektorskými vlastnostmi.

Jejich vzájemná interference by měla být co nejnižší.

Při odběru nebo vtlačení by nemělo docházet k tlakovým anomáliím v kolektoru.

2.3 Režimy práce PZP

Provoz podzemního zásobníku plynu závisí na těžebních režimech. Jsou využívány tyto režimy:

a) Expanzní režim

Typický pro PZP, které zaujímají celý objem ložiska. Je zde omezený přítok ložiskové vody do ložiska, kdy původní ložisková voda byla plynem primárního ložiska úplně nebo částečně vytlačena.

b) Vodní režim

Spíše teoretická varianta režimu práce PZP. Úbytek energie v ložisku je plně nahrazen přítokem vody do ložiska.

c) Smíšený režim

Energie ložiska je tvořena tlakovým projevem pohybujícího se vodního zápolí a plynu uskladněného v pórovém prostředí. Každý pokles, resp. nárůst tlaku je doprovázen pohybem vodního zápolí, to se projevuje rozdílnými tlaky při těžbě a vtláčení.

2.4 Části PZP

Podzemní zásobník plynu má **2 části: podzemní část a povrchové technologie.**

V případě podzemní části se jedná o ložiskovou strukturu, příp. kavernu a sondy. Vtláčně - odběrové sondy současně tvoří technologické propojení s povrchovou částí. Povrchová technologická část je pak připojena k plynárenské síti.

2.4.1 Podzemní část

Ložisková část: Podzemní prostor, kde se vytváří akumulace skladovaného ZP. V případě vytěžených ložisek uhlovodíků a aquiferových PZP se jedná o porézní nebo puklinovou horninu, tzv. kolektor (písky, pískovce, štěrky, brekcie, dolomity).

Kavernovým zásobníkům slouží pro akumulaci plynu přírodní nebo uměle vytvořená podzemní dutina. Objem zde uskladněného plynu závisí na jejich rozměrech a intervalu provozních tlaků. Ty mohou být větší ve srovnání s PZP v horninovém prostředí.

Sondy - podle účelu použití se dělí na:

a) provozní (vtlačně - odběrové)

- propojují přímo povrchové technologie s plynovou částí zásobníku
- musí otevírat zásobníkový obzor tak, aby objemově vykryly celý jeho prostor

b) pozorovací

- v nadloží – sledují vertikální hermetičnost zásobníku
- ve vodním zápolí – sledují vývoj ložiskových tlaků ve vodním zápolí
- plynové – kontrolují vývoj ložiskového tlaku, kdy jsou v průběhu vtláčení nebo odběru zapojeny všechny vtláčně - odběrové sondy

c) účelové

2.4.2 Povrchová technologie

Skládá se z následujících technologických celků:

- **zařízení pro dopravu zemního plynu**
 - plynovody a přípojky k sondám
 - kompresory, turbíny
- **zařízení pro úpravu zemního plynu**
 - separátory, mikrofiltry (čištění)
 - kotle ohřevu (ohřev)
 - sušicí kolony (sušení)
- **měření a regulace**
 - tlaky, teploty, průtok
 - vlastnosti a parametry zemního plynu
- **pomocné**
 - olejové hospodářství, aj.

3. Podzemní zásobníky plynu v ČR

Přehled podzemních zásobníků plynu v České republice a společností, které je provozují:

- RWE Gas Storage, s.r.o.
 - Dolní Dunajovice
 - Háje
 - Lobodice
 - Štramberk
 - Třanovice
 - Tvrdonice
- SPP Storage, s.r.o.
 - Dolní Bojanovice
- MND Gas Storage, s.r.o.
 - Uhřetice

3.1 Dolní Dunajovice

„Podzemní zásobník plynu Dolní Dunajovice se nachází 6 km severně od Mikulova. Je největším zásobníkem plynu v České republice (obr. 6).

Geologie:

Drenážní horninu plynového ložiska uloženou v hloubce 1050m pod povrchem tvoří glaukonitické pískovce až prachovce. Vrchol struktury tvoří věstonický zlom o výšce skoku cca 150 m v úrovni mesozoických vápenců, na které přímo transgredovala eggenburgská



klastika. Nadloží plynonosného horizontu tvoří vápnité jílovce, jejichž svrchní hranicí prochází rozhraní eggenburg - karpát. V jižní části struktury byla v karpatských sedimentech objevena ještě malá akumulace plynu v hloubce - 660 m.

Obrázek 6 – PZP Dolní Dunajovice [30]

Nadzemní část:

PZP má technologii pro vtláčení i pro těžbu plynu, přičemž část technologie pro vtláčení i těžbu je společná. Součástí PZP jsou čtyři sběrná střediska.

PZP je napojen na plynovody přepravní soustavy DN 700/500 PN 63 Uherčice-Dolní Dunajovice.

Technologie pro vtláčení se skládá z dále uvedených základních částí:

Vstupní filtry pro čištění plynu, měření množství plynu před vtláčením do zásobníku, čtyři boxerkompresory ČKD typ 4 JBK 240 s elektropohonem, chladiče plynu, odlučovače oleje pro odloučení oleje z plynu, sběrná střediska s měřicími a regulačními tratěmi sond, provozní sondy, plynovody s propojovacími kolektory.

Technologie pro těžbu se skládá z dále uvedených základních částí:

Provozní sondy a zařízení pro nástřik metanolu, sběrná střediska s měřicími a regulačními tratěmi sond, zařízení pro separaci (odvodnění ložiskové vody) a ohřev plynu (zvýšení teploty plynu před snížením jeho tlaku), sušením plynu (odstraněním vodních par z plynu) a regenerace glykolu, výstupní filtry pro čištění plynu, měření množství plynu před jeho expedicí do přepravní soustavy, plynovody s propojovacími kolektory.“ [27]

3.2 Háje

Kavernový zásobník Háje je zásobník vybudovaný v krystalinických strukturách (obr.7).

Geologie:

„Podzemní část zásobníku se nachází v granodioritovém masivu střečeského plutonu. Granodiorit blatenského typu, středně zrnitý granodiorit s faciem



Obrázek 7 – PZP Háje [35]

jemnozrnného biotitického až amfibolicko - biotitického granodioritu, dosahuje až na povrch.

Skladovací prostor pro zemní plyn byl vytvořen ražením a těžením horniny z podzemí. Byl vyražen v jednom horizontu se spádem 5 ‰ v hloubce od 961 metrů u ústí pěti těžebních sond, po hloubku 955 m na druhém konci zásobníku ve vzdálenosti cca 1350 metrů. Soustava chodeb s profilem 12 až 15 m² o celkové délce 45 066 m vytváří prostor pro skladování zemního plynu. Vyražené chodby byly ponechány bez povrchové úpravy, pouze v místech, kde byla hornina silně rozvolněna, a hrozilo zavalení chodby, byly postaveny trvalé výztuže. Místa s průsaky vody puklinami ve skalním masivu byla dotěsněna injektáží.

Důležitou částí spodní stavby je tlaková uzávěra uzavírající dva dopravní překopy, které zajišťovaly přístup do prostoru zásobníku. Před zahájením výstavby definitivních zátek byla v přístupové chodbě k mezizátkovému vrtu provedena zkušební zátka. Na tomto tělese byl ověřen matematický model zátky, byly zkoumány objemové změny tělesa zátky v závislosti na vývinu hydratačního tepla, těsnost okolní horniny kvalita a technologie nastříkaného drátkobetonu. Po injektáži tělesa zkušební zátky a okolní horniny bylo tlakováním prostoru za zátkou směrem k mezizátkovému vrtu ověřeno chování masívu a zátky při vyšším tlaku než je hydrostatický. Na základě získaných výsledků byla definována technologie nástřiku drátkobetonu, injektážních prací a stanovena kriteria pro vodní tlakové zkoušky. Ruční stříkání drátkobetonu bylo nahrazeno nástřikem pomocí manipulátoru. Po ukončení zkoušek byl do tělesa zkušební zátky proražen otvor, aby byl zajištěn přístup k mezizátkovému vrtu. Změna technologie míchání, dopravy a vlastního nástřiku drátkobetonové směsi byla následně ověřena na zkušebním tělese č. 2.

Tlaková uzávěra sestává ze čtyř tlakových zátek, na každém překopu dvě. Tělesa tlakových zátek jsou vybudována technologií stříkaného drátkobetonu. Každá tlaková zátka je betonové těleso o celkové délce 10 m. Střední část zátky je po celém obvodu kuželovitě zapuštěna na hloubku 1,2 m do okolní horniny. Okrajové úseky zátky vyplňují stávající profil překopů. Betonová tělesa jsou z obou stran ohraničena ocelovými pancíři uzavírajícími celý profil překopu. Horninový masiv u zátek je zpevněn ocelovými svorníky. Z důvodu zvýšení nepropustnosti horniny byla v úseku betonového tělesa zátky

provedena injektáž horniny. Současně s betonáží byla provedena injektáž spáry mezi betonovým tělesem a horninou. V předpolích před a za tělesem byla provedena betonáž a po úpravě ostění nanesena hydroizolační ochranná folie pokrývající celý obvod profilu překopu. Mezi zátkami jsou překopy propojeny rozrážkou, na kterou navazuje přístupová chodba k mezizátkovému vrtu.

Princip utěsnění skalního masivu spočívá ve vytvoření tlakové vodní clony kolem zátek na straně plynu. Pro vytvoření vodní tlakové clony proti unikání plynu kolem zátek jsou na předpolí na vodní straně těchto zátek vyvrtány dva vějíře zavodňovacích vrtů, které jsou vedeny kolmo na obrys překopů. Tlaková voda z mezizátkového prostoru a zavodňovacích vrtů proniká do puklin a trhlin v okolním horninovém masivu a působí proti tlaku plynu. Tlak vodní clony v mezizátkovém prostoru je udržován vyšší o 0,5 MPa tlakem dusíku nad vodní hladinou. V případě poklesu hladiny vody v mezizátkovém vrtu pod 250 metrů je voda automaticky doplněna na požadovaný stav.

Druhým technologickým vrtem je odvodňovací vrt, který je zaveden do nejnižšího místa v zásobníku. V tomto místě je jímka, do které stéká voda z celého zásobníku. Vrt je vystrojen pažnicí, čerpacími trubkami a ejektorovým čerpadlem, které slouží na odčerpávání vody z podzemí.

Podzemní skladovací prostor pro zemní plyn je s povrchovou technologií spojen pěti vtlačně-odběrovými sondami. Konstrukce sond je řešena s přihlédnutím k zadání a skutečnosti, že sondy musí bezporuchově sloužit po celou dobu životnosti zásobníku. Pažnice kolony má průměr 9 5/8" a odolnost na vnitřní přetlak 28,3 MPa. Koeficienty bezpečnosti 2,26 na vnitřní tlak a 1,6 na vnější tlak vyhovují v základních parametrech pro namáhání pažnicové kolony.

Nadzemní část:

V areálu nadzemní části zásobníku jsou umístěna zařízení, která se podílejí na úpravě a transportu plynu.

Plyn je do areálu zásobníku přiveden plynovodem přepravní soustavy DN 500 PN 63 Zvěstov - Háje, který je napojen na plynovod DN 700 PN 63 Veselí nad Lužnicí - Praha. Plyn je nejprve veden přes separátory, kde se oddělí mechanické a kapalné

nečistoty. Vyčištěný plyn je možno dodávat přes regulační stanici do distribučních plynovodů Středočeské plynárenské, které jsou vedeny směrem na Příbram a Kasejovice.

V případě nastavení režimu vtlačení do podzemí je zemní plyn nejprve předeřát a následně je jeho tlak zredukován na tlak v kaverně. Před vstupem do kaverny je měřeno jeho množství. Není-li již možné vtlačet plyn vlastním tlakem z plynovodu, plyn se po změření množství vede do kompresorovny a teprve po kompresi a případném chlazení do kaverny.

Při těžbě se plyn po výstupu z kaverny nejprve zbaví nečistot na separátorech. Potom následuje sušení plynu. Dále je plyn podle potřeby předeřát, jeho tlak je redukován na tlak v plynovodu a ještě před vstupem do plynovodu je změřeno jeho množství. Odběrem plynu z kaverny postupně klesá ložiskový tlak. Není-li již možné těžít vlastním tlakem, změní se tok plynu a zapojí kompresory. Po filtraci se plyn vede do kompresorovny a teprve stlačený plyn vstupuje do sušení. Po změření množství je plyn předáván do plynovodu přepravní soustavy a do plynovodu distribuční soustavy.“[27]

3.3 Lobodice

„Podzemní zásobník plynu Lobodice je jediným aquiferovým a současně i prvním zásobníkem na území ČR (obr. 8). Je situován v Hornomoravském úvalu, 13 km jihozápadně od Přerova, v blízkosti obce Lobodice.



Obrázek 8 – PZP Lobodice [27]

Geologie:

Lobodická struktura je řazena do Chropýnského úvalu. Podloží je tvořeno metamorfovanými horninami paleozoického stáří. Vytváří významnou elevaci značně zlomově narušenou, která je tvořena horninami krystalinika zejména chloritickými až chloriticko-serticitickými fylity a grafitickými břidlicemi. Vlastní uskladňovací horizont (kolektor) představují badenská bazální klastika třetihorního stáří. Jedná se o polymiktní hrubozrnné pískovce a slepence (brekcie). V zájmové oblasti pro uskladnění plynu v hloubce 400-500 m je průměrná mocnost bazálních klastik 12m a průměrná pórovitost

24%. Původně byly tyto vrstvy nasyceny slabě mineralizovanou vodou, odtlačení vody byl vytvořen zásobník plynu (aquiferového typu). Hermetičnost zásobníkové struktury směrem k zemskému povrchu zabezpečují zejména cca 300m mocné neogenní bádenské sedimenty, které jsou tvořeny vápnitými jíly (tégly). V jejich nadloží byly uloženy pliocenní sedimenty, zastoupené jíly, písky a šterky. Nejsvrchnější uloženiny čtvrtohorního stáří plynule navazují na sedimenty pliocénu.

Nadzemní část:

PZP je napojen na plynovod DN 500 PN 63 Bezměrov-Lobodice. Součástí PZP je jedno sběrné středisko.

Technologie vtláčení:

Vstupní plynovod, multifiltry, celkové měření množství plynu, regulační a měřicí řady, přípojka, sonda.

Technologie těžby:

Sonda, přípojka, regulační a měřicí řada, kolektor, sušení plynu, celkové měření množství, regulační řada, výstup a měření plynu.“ [27]

3.4 Štramberk

„Štramberk se nachází v podhůří Beskyd. Centrální areál podzemního zásobníku plynu se nachází 2 km jihovýchodně od města (obr.9).



Obrázek 9 – PZP Štramberk [27]

Geologie:

PZP Štramberk byl vytvořen v korektorských horninách karpatského horizontu H2 náležející sedimentární výplni karpatské předhlubně. Geologická stavba ložiska i jeho okolí je podmíněna příkrovovou stavbou jednotek vnějšího flyšového pásma západních Karpat, přesunutých přes třetihorní sedimenty karpatské předhlubně. K akumulaci zemního plynu a vzniku ložiska Příbor – jih došlo ve vrstvách karpátu, která leží transgresivně na sedimentech paleozoika, převážně na horninách karbonského stáří. Skladovací obzor

sloužící ke skladování ZP je uložen v hloubce 500 – 690 m pod povrchem, je plošně značně rozsáhlý a dobře sledovatelný. Převládajícím litologickým typem produktivního obzoru je jemnozrnný křemito-vápnitý pískovec s jílovito-prachovitou základní základní hmotou a hrubozrnný až slepencovitý pískovec. Z regionálního hlediska má obzor tvar ploché poloklenby. V nadloží plynového obzoru byly zjištěny příkrovy vnějšího flyšového pásma, příslušející slezské a podslezské jednotce, které se nasunuly na třetihorní horniny a mají funkci krycí vrstvy.

Nadzemní část:

Tlak plynu v přírodním plynovodu přepravní soustavy DN 500 PN 63 Libhošť-Štramberk se pohybuje v rozmezí 4,5÷5,5 MPa. Uskladňování plynu je prováděno bez použití kompresoru. Technologické zařízení v areálu PZP je tvořeno filtry, kde je plyn zbaven mechanických a kapalných nečistot, dále regulačním nařízením pro nastavení potřebné tlakové úrovně a obchodním měřením, kde je zjišťováno celkové množství vtlačeného plynu. Plyn je následně dopravován třemi potrubními systémy z areálu k sondám. Potrubní systém napojení sond je kolektorový, potrubí se postupně větví až k jednotlivým sondám a současně se zmenšuje jeho světlost (z DN 500 na DN 100). U sond prochází plyn regulačním ventilem, měřicí clonou a odlučovačem. Při těžbě prochází plyn při vstupu ze sondy odlučovačem, měřicí clonou a regulačním ventilem. Proti tvorbě hydrátů je do těženého plynu nastříkáván metanol. V areálu PZP pak opět prochází filtry, dále sušícími řadami a změřený odebíraného množství se plyn přepouští do distribučních plynovodů Severomoravské plynárenské směrem na Ostravu a Valašské Meziříčí.“ [27]

3.5 Třanovice

„Podzemní zásobník plynu Třanovice se nachází na severní Moravě, jihozápadně od Českého Těšína (obr. 10). PZP je vybudován v prostorech bývalého ložiska plynu. Celé ložisko se skládá ze 4 celků, a to



Obrázek 10 – PZP Třanovice [27]

Nového pole, Západního pole, Čocky a Starého pole.

Geologie:

Z geologického hlediska je ložisko umístěno ve vrcholové části pohřbených údolí na severních svazích tzv. "Žukovského hřbetu", který je tvořen převážně karbonskými horninami. Hlavní ložiskový obzor představují bazální klastika spodního badenu, které vyplňují stará údolí karbonského reliéfu. Litologicky představuje badenský kolektor převážně jemně až hrubě zrnité pískovce a slepence. Ložisko se nachází ve střední hloubce 445 m a je charakterizováno expanzním režimem. Těsnění obzoru je zajištěno nadložními badenskými jíly a násunovou plochou karpatských příkrovů.

Nadzemní část:

Vlastní areál zásobníku se rozkládá na ploše 2 ha a je tvořen následujícími celky: provozní budova, víceúčelový objekt, skladové hospodářství, filtrace plynu, kompresorová hala, sušení a ohřev plynu, předávací a regulační stanice, kotelna, potrubní rozvody, vodohospodářský objekt, skladové hospodářství, objekt náhradního zdroje.“[27]

3.6 Tvrdonice

„Komplex objektů podzemního zásobníku plynu Tvrdonice se nachází na jihovýchodní Moravě na katastrech obcí Tvrdonice, Kostice, Hrušky a Týnec nedaleko Břeclavi (obr. 11). Je prvním, tedy nejstarším zásobníkem na území bývalého Československa, který ke skladování zemního plynu využívá původních, primární těžbou částečně odtěžených přírodních ložisek kapalných a plynných uhlovodíků.



Obrázek 11 - PZP Tvrdonice [1]

Geologie:

Podzemní zásobník plynu patří geologicky k mladotřetihorní Vídeňské pánvi, rozprostírající se jak na území České republiky, tak i Slovenska a Rakouska. Tato pánev

patřila k nejbohatším naftoplynovým oblastem ve střední Evropě. Podzemní zásobník se nachází ve východní části moravské ústřední prohlubně, na nalezišti Hrušky.

Strukturně se jedná o protáhlou poloklenbu podél lanžhotsko-hrušeckého zlomu.

Ke skladování plynu se využívá několika z celé řady v různých hloubkách (v jednotlivých patrech) situovaných ložiskových objektů ropoplynového naleziště Hrušky.

Rozhodující skladovací kapacity představují 8., 12. až 14. sarmatský a 9. bádenský obzor, které se nachází v hloubkových intervalech od 1050 do 1600 m. V případě 9. – 11. obzoru se jedná o aquifer. Zemním plynem sycený kolektor (hornina) o mocnostech 7 až 30 m je tvořen převážně méně soudržnými jemnozrnnými písky, které v případě sarmatských obzorů vyžadují vystrojení těžebních sond protipískovými filtry.

Další obzor, se kterým je počítáno pro provoz je 9. – 11. sarmat.

Ve srovnání s ostatními provozovanými PZP je pro PZP Tvrdonice charakteristická větší hloubka uložení skladovacích objektů a z toho vyplývající vyšší hodnoty ložiskových tlaků.

S ohledem na složitou geologickou stavbu a počet skladovacích objektů je dalším charakteristickým znakem relativně vysoký počet těžebních i pozorovacích sond včetně speciální na utrácení důlní vody.

Souběžně se skladováním plynu doposud probíhá v některých dalších ložiskových objektech primární těžba ropy a plynu zabezpečovaná těžební organizací MND, a.s. Hodonín.

Nadzemní část:

Podzemní zásobník Tvrdonice je napojen na plynovod přepravní soustavy DN 500 PN 63 Hrušky – Tvrdonice - Mutěnice. Součástí PZP jsou dvě sběrná střediska. Čištění plynu od nečistot při vtláčení se provádí ve dvou stupních multicyklonech a prachových filtrech. Měření celkového množství, jak při vstupu, tak při výstupu se provádí na clonových měřicích tratích. Pro vtláčení se používá tři kompresorů ČKD typu 4 JBK 240 s elektropohonem s příslušným počtem vzduchových chladičů stačeného plynu pro vtláčení do skladovacích obzorů. Pro zajištění obchodních parametrů zemního plynu je při

odtěžování plyn z ložiska zařazeno separační a sušící zařízení s příslušnými technologickými ohřevy. Sondy jsou vybaveny automatickými nástřiky metanolu k zabránění tvorby hydrátů.“ [27]

3.7 Dolní Bojanovice

Podzemní zásobník plynu Dolní Bojanovice asi 10 km od Hodonína.

„Podzemní část zásobníku tvoří čtyři samostatné objekty – původní ložiska ropy a zemního plynu, které jsou situovány v hloubkovém intervalu 700–2100 m. Největší podzemní skladovací strukturou je Hlavní objekt (střední hloubka uložení cca 1600 m), jenž je drobnými zlomy rozdělen do tří různě vzájemně komunikujících ker. Druhým největším skladovacím objektem jsou tzv. čočky, uložené ve střední hloubce cca 1800 m. Skladovací objekt Lábský obzor jihovýchod je původně ropoplynové ložisko menšího rozsahu uložené v hloubce cca 2000 m. Čtvrtý skladovací objekt – 16. sarmat je původně plynové ložisko uložené v hloubce kolem 700 m. Horninu, ve které je uskladňován plyn, tvoří písky až pískovce o mocnosti do 20 m oddělené vrstvou jílovitých hornin.

Ve vzdálenosti cca 50–2000 m od centrálního areálu PZP jsou v trsech rozmístěny sondy. Celkový počet sond PZP D. Bojanovice činí 27 vtláčně odběrových a 14 pozorovacích. Povrchová technologie u sond umožňuje měření teploty, tlaku, měření a regulaci průtoku. Součástí je též zařízení nástřiku etanolu – inhibitoru tvorby hydrátů a u některých sond prvotní separace volné kapaliny, tzv. drip, s odpouštěním do nádrže. Provozní sondy jsou propojeny s centrálním areálem pomocí plynovodních přípojek, tzv. stromečkovým systémem.“ [20]

3.8 Uhřice

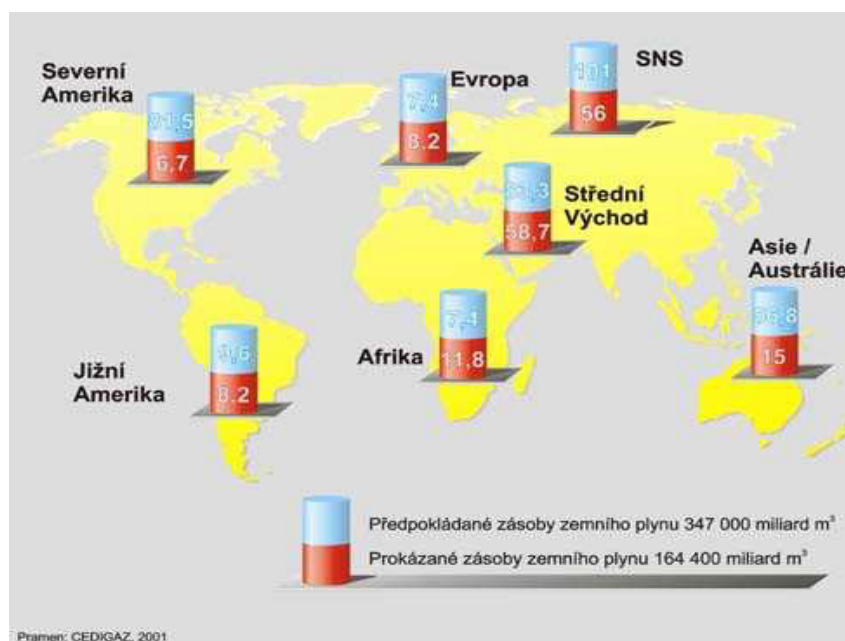
Podzemní zásobník plynu Uhřice byl uveden do provozu v roce 2001. V letech 2011 – 2012 proběhlo rozšíření PZP o skladovací strukturu Uhřice Jih. Tímto došlo k navýšení kapacity zásobníku na 280 mil. m³.

V okolí města proběhl v šedesátých letech 20. století geologický průzkum. Jeho cílem bylo nalézt ropu a plyn. V letech 1977 až 1980 byly vyhloubeny tři vyhledávací vrty. Sondou byla v hloubce asi 2 500 metrů objevena významná akumulace ropy a zemního

plynu. Během pokusné těžby vrt produkoval za den 20 tun ropy a 200 000 kubíků plynu; Poté se přistoupilo k pravidelné těžbě. Vytěžené prostory byly využity a v roce 2001 byl postaven podzemní zásobník plynu.

4. Problematika navyšování kapacity a výkonových parametrů PZP

Na World Gas Conference v Kuala Lumpur v roce 2012 byla předložena zpráva zpracování trendů vývoje PZP do budoucnosti. Očekává zvýšení poptávky po skladování v letech 2020 – 2030. Současná aktivní skladovací kapacita je $359 \cdot 10^9 \text{ m}^3$ a výhled do roku 2030 činí $503 \cdot 10^9 \text{ m}^3$. Jedná se tedy meziročně o nárůst $10 \cdot 10^9 \text{ m}^3$. Z toho důvodu existuje nyní v různých stádiích příprav a plánů **183 projektů** na zvýšení skladovací kapacity ve světě (obr. 12).



Obrázek 12 - Zásoby zemního plynu ve světě, cit. 10.11.2012 [34]

4.1 Projekt navýšení kapacity na PZP Třanovice

PZP Třanovice se nachází jihozápadně od Českého Těšína. Je vybudován na bývalém plynovém ložisku, které je umístěno ve vrcholové části pohřbeného karbonského Žukovského hřbetu. Skladovací kapacita PZP je 240 mil. m³, maximální těžební výkon 4,15 mil. m³/den. Roku 2008 byl schválen projekt zvýšení parametrů PZP tak, aby aktivní

skladovací kapacita byla navýšena 530 mil. m³ a hodnota maximálního těžebního výkonu byla 8 mil. m³ za den.

Provedly se modelové výpočty cílového stavu. Na základě výpočtů provedených v programech ECLIPSE, Petrel a HYSYS bylo možné původní hodnoty aktivní skladovací kapacity a maximálního denního těžebního výkonu navýšit. Nová aktivní skladovací kapacita vyšla 530 mil. m³, nový maximální těžební výkon 8 mil. m³.

Geologický model PZP: „Pro výpočty prognóz byly výkony produkčních sond naladěny v souladu s posledními známými hodnotami měření potenciálních produkcí na vrtech. To zahrnovalo úpravu parametrů sond v modelu tak, aby odpovídaly měřeným výkonům. U nových sond (nově vrtaných nebo opravovaných) byly tyto hodnoty většinou ponechány tak, jak vychází z modelu. U těchto sond byl předpoklad takových parametrů otvírky, aby byly zajištěny výkony cca 2,6 mil. m³/den ze Starého pole při ložiskové depresi 6,0 bar, u sond na Západním poli tak, aby se dosáhlo obvyklých výkonů sond PZP Třanovice. Těžba byla v modelu simulována po dobu 5 měsíců tak, aby ložisková deprese na sondách nepřesáhla 6,0 bar, dynamický a ložiskový tlak neklesnul pod 10,5 bar a tlak na ústí sond nedosahoval nižší hodnoty než 10,0 bar. Modelové výpočty ukázaly, že pokud by byly zvládnuty všechny kroky k realizaci rozvoje PZP Třanovice, je možné očekávat prognózovaných výsledků aktivních zásob ve výši 530 mil. m³ a udržení maximálního výkonu PZP ve výši 8,0 mil. m³/den po dostatečně dlouhou dobu.

Na základě modelových výpočtů byl stanoven cílový stav projektu na rozšíření kapacity PZP Třanovice. Toho bylo možné dosáhnout díky

- 1) zapojení Starého pole do systému PZP,
- 2) zapojení nových sond na Západním poli,
- 3) posunutí spodní hranice ložiskového tlaku všech skladovacích obzorů na hodnotu 1,30 MPa.“ [6]

Realizací 2 nových provozních sond s technologií a jejich napojením na systém PZP se zlepšilo využití skladovací kapacity na Západním poli a stabilizace těžební křivky. Sondy TS39 a TS43 byly umístěny u stávající provozní sondy Žu144. Tímto vznikla nová

„trojsonda“ a povrchová technologie zařízení sondy Žu144 byla přizpůsobena na výkon tří sond.

Aby byly splněny výkonové parametry pro těžbu plynu, bylo třeba navýšit výkon technologie sušení. Rekonstrukcí sušící kolony došlo ke zvýšení výkonu, a tím i ke zvýšení průtoku plynu přes sušící kolonu na 170 000 m³/hod.

4.2 Vlastnosti uskladňovací vrstvy

V důsledku přeměny bitumenu na kapalnou ropu v průběhu katagenese dochází v roponosné hornině migraci nově vzniklé kapalně a plynné fáze. Plyn může migrovat z matečné horniny jen v tom případě, že sousedící vrstva v nadloží nebo podloží má větší poróznost a je pro plyn propustná. Hlavní příčinou této primární migrace je geostatický tlak. V zemské kůře se každých cca 100 m hloubky zvyšuje tlak nadloží průměrně o 2,3 MPa. Kolektorová hornina je zpravidla velkopórezní (např. pískovec) a má póry vyplněné podzemní vodou. Hydrostatický tlak v otevřených pórech kolektoru je vždy nižší než okolní tlak geostatický. Tlaková difference mezi fluidem uzavřeným v matečné hornině a vodou v pórech kolektoru podporuje migraci plynu směrem do kolektoru. Předpokládá se, že rozpínání kapalně a zejména plynné fáze, těsně uzavřené v malých pórech matečné horniny převyšuje okolní geostatický tlak o dalších 10 – 20 %. Vnitřní přetlak roztahuje póry a vytváří v matečné hornině mikropukliny, které uvolňují ropě a hlavně plynu cestu do kolektoru. Po výronu kapalně a plynné fáze se mikropukliny vnějším tlakem opět uzavřou a proces se opakuje až do vyrovnání tlaků.

Plyn či ropa jsou v ložisku uzavřeny pod určitým tlakem, tzv. ložiskovým. Ten je ve většině případů stejný jako tlak hydrostatický.

Je-li plyn při další, sekundární migraci zadržen nepropustnou překážkou, může dojít k jeho akumulaci a vytvoření ložiska. Je nutné, aby kolektorová hornina a nepropustná překážka byly v takové vzájemné pozici, že vytvoří tzv. **past**.

Nepropustná vrstva je obecně definována jako sediment, nepropustná hornina nad ložiskem zemního plynu, nebo nepohyblivé kapalně či plynné medium s vysokým kapilárním vstupním tlakem, které zabraňuje jeho migraci. Mezi nepropustné vrstvy patří např. solanky, anhydridy a břidlice.

Ložisková hornina obsahuje kromě namigrovaných uhlovodíků také vodu, která je vlivem smáčivosti, kapilárních sil a povrchového napětí pevně vázaná na horninu. Tato voda tedy zaujímá určitý objem v pórech horniny, které nemohou být nasyceny uhlovodíky.

4.3 Smáčivost

Smáčivost je schopnost kapaliny udržovat kontakt s pevným povrchem. Stupeň smáčení je pak dán projevem adhezních a kohezních sil.

Kohezní práce W_k je důležitá pro izotermní roztržení sloupce kapaliny o jednotkové ploše průřezu, tj. pro vytvoření dvou nových rovnovážných rozhraní s plynnou fází, která sloupec obklopuje:

$$W_k = 2 \gamma_A, \quad (4.3.1)$$

kde γ_A je povrchová energie fáze A.

„Adhezní práce W_a je potřebná pro izotermní roztržení dvou fází A a B podél fázového rozhraní plochy, kdy zanikne mezifáze A a B o energii γ_{AB} a vytvoří se dva nové jednotkové povrchy fází A a B o povrchových energiích γ_A a γ_B .“ [29] Lze vyjádřit Dupréovou rovnicí:

$$W_A = \gamma_A + \gamma_B - \gamma_{AB} \quad (4.3.2)$$

Rozdíl mezi adhezní a kohezní silou je tzv. rozestírací koeficient S_R

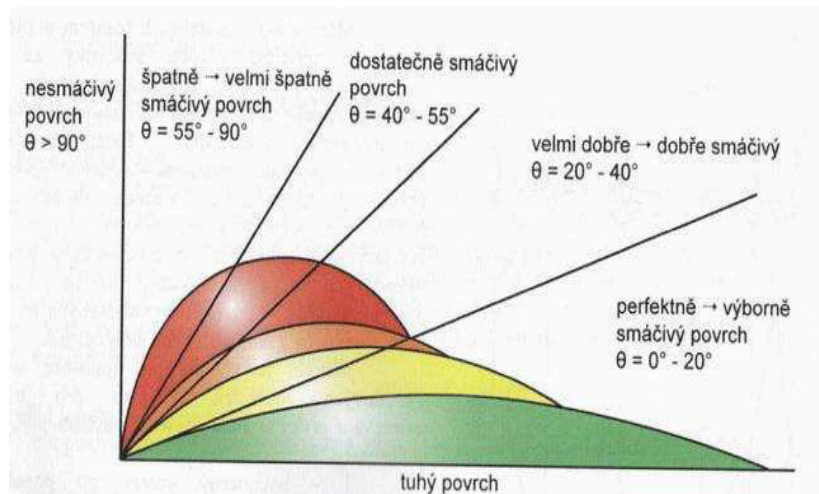
$$S_R = W_A - W_K \quad (4.3.3)$$

Je – li tento koeficient kladný, $W_A > W_K$, kapalina se rozestře na povrchu pevné látky.

Pokud je koeficient záporný, $W_A < W_K$, kapalina na povrchu vytvoří kapky.

U nemísitelného systému, jako je voda – organická látka, bude docházet k rozestření organických kapalin.

Mírou smáčení kapaliny na pevném povrchu je tzv. **úhel smáčení** neboli **kontaktní úhel θ** (obr. 13), který leží mezi mezifázovými rozhraními kapalina – tuhá látka a kapalina – plyn.



Obrázek 13 – Smáčivost povrchu podle velikosti smáčecího úhlu[36]

Každému mezifázovému rozhraní odpovídá příslušné povrchové napětí:

kapalina – tuhá látka : γ_{LS}

plyn – tuhá látka : γ_{GS}

kapalina – plyn : γ_{LG}

Vztah mezi úhlem smáčení θ a jednotlivými mezifázovými rozhraními lze vyjádřit Youngovou rovnicí:

$$\cos \theta = \frac{\gamma_{GS} - \gamma_{LS}}{\gamma_{LG}} \quad (4.3.4)$$

Podle velikosti úhlu smáčení θ určujeme, zda kapalina povrch smáčí nebo nesmáčí.

Povrchové síly a smáčivost jsou odpovědné za tzv. **kapilární efekt**.

4.4 Kapilarita

Kapilarita neboli kapilární jevy je způsobena kapilárním tlakem. Kapilární tlak vzniká v důsledku zakřivení volného povrchu kapaliny. Těsně pod dutým povrchem je

vnitřní tlak menší, než tlak pod rovinným povrchem kapaliny, a to o **kapilární tlak** p_c . Pokud hladina v kapiláře stoupne, mluvíme o tzv. **kapilární elevaci**, v případě poklesu hladiny v kapiláře se jedná o tzv. **kapilární depresi**.

„Uvažujme kapalinu s povrchovým napětím σ , která dokonale smáčí stěny nádoby. Po ponoření kapiláry s vnitřním poloměrem R do kapaliny se v kapiláře vytvoří dutý povrch tvaru polokoule o poloměru R . Pod ním je vnitřní tlak menší o kapilární tlak p_c ve srovnání s vodorovným povrchem v širší nádobě. To má za následek, že v kapiláře vystoupí kapaliny do takové výšky h , při níž je hydrostatický tlak odpovídající sloupci kapaliny výšky h stejný jako tlak kapilární. Lze tedy psát:

$$h\rho g = \frac{2\sigma}{R}, \quad (4.4.1)$$

kde ρ - hustota kapaliny.

Odtud je možné určit výšku h při kapilární elevaci:

$$h = \frac{2\sigma}{R\rho g} \quad (4.4.2)$$

Zvýšení volné hladiny v kapiláře je tedy pro danou kapalinu nepřímo úměrné poloměru kapiláry.

Analogicky je možné odvodit vztah pro snížení h' hladiny kapaliny při kapilární depresi.

V případě skutečné kapaliny (reálné kapaliny) má výraz pro výšku kapaliny v trubici tvar

$$h = \frac{2\sigma \cos \theta}{R\rho g} \quad (4.4.3), [17]$$

Ložisková past obvykle obsahuje nemísitelné fáze: ropu, vodu a plyn. Síly, které drží tyto fáze ve vzájemné rovnováze, jsou kapilární síly. Kapilární tlaky jsou výsledkem povrchového napětí při styku dvou fází v pórovitém prostředí horniny (např. ropa – voda, plyn – voda). Jedna fáze je pro ložiskovou horninu tzv. smáčivá a druhá fáze nesmáčivá (plyn představuje vždy nesmáčivou složku). Absorpce horniny pro danou kapalinu se nazývá **smáčivost**.

Kapilární tlak v horninách je tlak, při kterém nesmáčecí fáze vytěsňuje smáčecí fázi a je řízen mezifázovým napětím mezi zrny, smáčivostí a velikostí pórů a jejich distribucí. Vyjadřuje se jako rozdíl tlaku existující mezi 2 nemísitelnými fázemi, tzn. Smáčivou (P_w) a nesmáčivou fází (P_{nw}):

$$P_c = P_{nw} - P_w \quad (4.4.5)$$

Pro systém ropa – voda platí:

$$P_c = P_o - P_w \quad (4.4.6)$$

Pro systém plyn - ropa platí:

$$P_c = P_g - P_w \quad (4.4.7)$$

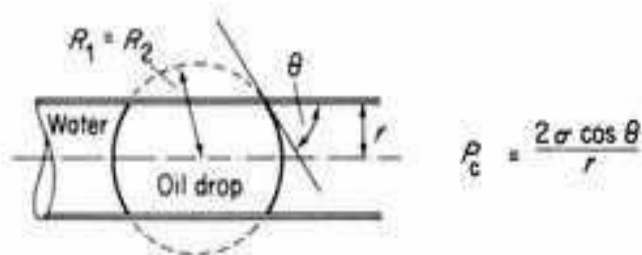
Pro uskladňování plynu je tento tlak významným parametrem, je limitní hodnotou pro skladovací provozní tlak, stejně tak permeabilita.

Do skladovacího obzoru je vtlačén plyn prostřednictvím provozních sond. Aby byla vytěsněna voda obsažena v pórech kolektoru, je třeba, aby vtláčecí tlak převýšil původní tlak v aquiferu. Musí se však zabránit mechanickému poškození přetlakovaných vrstev a průniku plynu do nadloží, proto nesmí dojít k překročení určité maximální hodnoty tlaku v zásobníku.

Se zvyšující se vzdáleností od oblasti vtláčení plynu dochází k poklesu pohybu vody a tlakovým změnám z důvodu kompresibility a viskozity vody. V určité vzdálenosti od této oblasti jsou už tyto tlakové projevy téměř neměřitelné.

Důležitá je plynotěsnost těsnícího nadloží, která je založena na existenci kapilárních jevů. Průnik plynů do pórů velmi malých průměrů vyžaduje vyšší tlak než je tlak vody v těsnícím nadloží. Tento navýšený tlak se nazývá **kapilární prahový tlak** a je limitní hodnotou pro skladovací provozní tlak.

Jeho hodnota odpovídá průměru největšího póru v pórovitém prostředí (obr.14) a může být vypočítán za použití Laplaceovy rovnice:



Obrázek 14 – Pórovité prostředí [3]

Legenda: Water – voda, Oil drop – ropná kapka.

$$P_c = \frac{2\sigma \cos \theta}{r}, \quad (4.4.8)$$

kde $\cos \theta$ – kontaktní úhel, σ – povrchové napětí, R - poloměr póru.

4.5 Propustnost

Propustnost (permeabilita) vyjadřuje schopnost pórovitého prostředí propouštět svými póry vodu. Rozlišujeme propustnost absolutní, která se vyjadřuje koeficientem propustnosti (K_p) a propustnost relativní, tj. pro určitou tekutinu při společném proudění směsí s více fázemi (např. voda a plyn).

$$K_p = \frac{\mu \cdot Q \cdot L}{A \cdot \Delta P}, \quad (4.5.1)$$

kde μ - dynamická viskozita kapaliny, γ – měrná tíha tekutiny.

Na vodu nacházející se v horninovém prostředí působí gravitace, hygroskopické síly na povrchu zrn, osmotické napětí, tlak plynů a kapilární síly v dutinách. Pokud jsou všechny tyto síly v rovnováze, nedochází k pohybu vody. Naopak, voda se dostává do pohybu až při nerovnovážném stavu, a začíná na ní působit tření.

Podle prostupu podzemní vody horninami, rozeznáváme propustnost:

- puklinovou – skalní horniny, zpevněn klastické sedimenty a karbonáty,
- průlinovou – písčité a štěrkovité zeminy, pískovce,
- dutinovou – karbonáty, skalní horniny s různým stupněm zvětrání,
- krasovou

Horniny jsou prostoupeny dutinami různých rozměrů, dělí se na: jeskyně, kaverny, póry, trhliny a pukliny.

4.6 Pórovitost

Z hlediska jímavosti a komunikace kapalin a plynů je důležitá **pórovitost P**, tj. objem pórů V_p k celkovému objemu horniny V_h .

$$P = \frac{V_p}{V_h}, \quad (4.6.1)$$

Pórovitost můžeme rozlišit na:

- a) celkovou P_c – podíl objemu všech pórů V_{pc} k celkovému objemu horniny

Celkovou pórovitost lze vypočítat přes objemovou hmotnost ρ_v

$$\rho_v = \frac{M_h}{V_m}, \quad (4.6.2)$$

kde M_h – hmotnost vzorku horniny, V_m – objem horniny bez pórů, P_c – celková pórovitost.

- b) otevřenou P_o – póry schopné komunikace, tj. poměr objemu všech navzájem komunikujících pórů v hornině V_{po} k celkovému objemu horniny V_h

$$P_o = \frac{V_{po}}{V_h} \quad (4.6.3)$$

4.6.1 Efektivní pórovitost

„Mezi horninovými částicemi kolektoru a tekutinami vyplňujícími jejich dutiny dochází k fyzikálním interakcím. V tekutinách na fázovém rozhraní vzniká povrchové napětí, příp. na hranici s tuhou fází síly adsorpční. Jejich působením se tvoří vrstvy nepohyblivé nebo omezeně pohyblivé tekutiny. Tím se zmenšuje průměr a tedy i objem pórů, které se účastní různých hydraulických pochodů, a zvětšují se průtočné odpory.“ [14]

Voda pevně vázaná na povrchu stěn pórů není pohyblivá, z toho důvodu zmenšuje průtočný profil pórů. Místo pórovitosti se tedy používá tzv. **efektivní (účinná) pórovitost**, která upřesňuje objem pórů s pohyblivou vodou.

Efektivní pórovitost P_u vyjadřuje podíl objemu pórů účastnících se různých aerodynamických nebo hydrodynamických pochodů V_{pu} k objemu horniny včetně pórů V_h .

$$P_u = \frac{V_{pu}}{V_h} \quad (4.6.1.1)$$

Můžeme definovat také **neúčinnou pórovitost P_n** , což je objem pórů, ve kterých je voda vázaná adsorpčními, hydroskopickými a částečně kapilárními silami, k celkovému objemu prostředí.

U plynových ložisek je plynem vyplněna pouze určitá část pórového prostranství a zbytek je vyplněn vodou. Voda má vyšší stupeň přilnavosti k horninám než plyn, vzniká na povrchu horninových částic membrána vázané vody, a jen vnitřní část pórového prostranství zaujímá plyn.

Podzemní zásobníky plynu – aquiferové mají jistá specifika, která jsou založena na změnách fázového sycení pórů, resp. volných prostorů ve zvodnělé pórovité hornině. Jedním z těchto specifíků je právě odlišná povaha průběhu a stavu sycení pórů uskladňovací vrstvy ve srovnání s kolektory plynových ložisek. Procesy, které při formování ložisek plynu trvaly statisíce a více let, při migraci a oddělování plynné fáze, v aquiferové vrstvě proběhnou během několika let. Stupeň nasycení pórů plynem je tedy v tomto případě menší než u plynového ložiska. V aquiferových podmínkách má vodní fáze mnohem větší povrch ve volných pórech uskladňovací vrstvy než u plynového ložiska. Z toho důvodu dochází k tomu, že část plynu se při poklesu tlaku vylučuje z vody obsažené v kolektoru, v níž byl plyn obsažen. Ale větší množství plynu se ve vodě, která v určitém množství v pórech uskladňovací vrstvy zůstane, rozpouští a dochází k jeho vázání na vodu. Vlivem probíhající filtrace plynu vrstvou během většího počtu uskladňovacích cyklů se toto množství zbytkové nevytěsněné vody postupně zmenšuje. A při těžbě plynu z podzemního zásobníku bývá množství vody a kondenzátu vždy vyšší než při provozu podzemního zásobníku vytvořeném ve vytěženém ložisku zemního plynu.

Vlivem těchto jevů dochází také ke změnám efektivní propustnosti vlivem měnícího se fázového sycení náplně v uskladňovací vrstvě. Jejich intenzita a dynamika je pak pro každou horninu rozdílná, a v důsledku toho dochází ke zvyšování tzv. „stupně osušení“ pórů uskladňovací vrstvy. Vlivem těchto změn se mění i její režimové vlastnosti,

kteřé měly mít v normálních podmínkách vliv hlavně na postupné zvyšování výkonnosti uskladňovacího objektu. Současně však mohou probíhat i procesy místní blokace pórů solemi – zejména železem, výplachem, horninovými částicemi a dalšími vlivy souvisejícími s procesem vtlačení plynu.

Snahou je dosáhnout co nejintenzivnějšího a nejrychlejšího způsobu vytěsnění vody, a tím zvýšení celkového množství uskladněného plynu.

4.7 Určení nejvyššího provozního tlaku

Nejvyšší provozní tlak podzemního zásobníku plynu se určuje tak, aby se zabránilo následujícímu:

- mechanickému porušení
- průniku plynu těsnícím nadložím
- ohrožení celistvosti sond

Nejvyšší tlakový limit $p_{\max, 1}$ je dán:

$$p_{\max, 1} = X \cdot H_{\min}, \quad (4.7.1)$$

kde $p_{\max, 1}$ – nejvyšší tlakový limit v MPa, X – nejvyšší tlakový gradient v $\text{MPa} \cdot \text{m}^{-1}$, H_{\min} – nejmenší mocnost nadloží počítaná od báze těsnícího nadloží v m.

Do těsnícího nadloží by plyn neměl proniknout vytlačení vody. K tomuto průniku by došlo v případě, že rozdíl mezi tlakem vody v těsnícím nadloží a tlakem plynu pod těsnícím nadložím byl větší než kapilární prahový tlak.

Nejvyšší tlak $p_{\max, 2}$ je dán:

$$p_{\max, 2} = p_w + p_c, \quad (4.7.2)$$

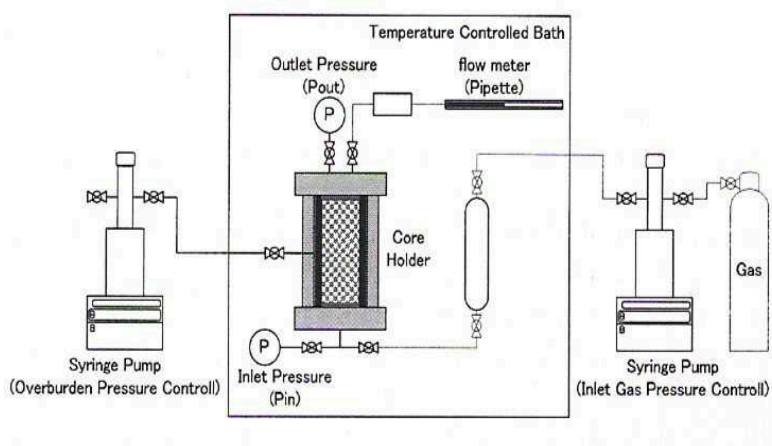
kde $p_{\max, 2}$ – nejvyšší tlak v MPa, p_w – původní tlak vody na bázi těsnícího nadloží v MPa, p_c – kapilární prahový tlak těsnícího nadloží v MPa

Nejvyšší provozní tlak je nižší než $p_{\max, 1}$ a $p_{\max, 2}$. Tato podmínka je splněna, pokud je toto splněno v oblasti vrcholového bodu zásobníku, těsnící nadloží je stejnoměrné a pásma vtlačování a minimálního pokrytí se shodují s touto oblastí.

5. Současná metodika měření prahových kapilárních tlaků

Ve studii „Measurement of threshold capillary pressure for seal rocks using the step by step approach and the residual pressure approach“ autoři použili tři postupy měření prahového kapilárního tlaku.

Prvním postupem je tzv. Standardní metoda (obr. 15). Sestává z postupného zvyšování tlaku nesmáčecí fáze na vstupním čele vzorku, který je plně nasycen. Když vstupní tlak překročí určitou hodnotu, nesmáčecí fáze (plyn) plynule prochází póry jádra a dochází k jeho průniku. Tehdy je dosaženo prahu kapilárního tlaku. Při této metodě intenzita toku plynu v jádře zpravidla nízká, protože nepropustné krycí horniny mají velmi malou propustnost. To může vést k přecenění nebo naopak podcenění prahu kapilárního tlaku.



Obrázek 15 – Schéma standardní metody [8]

Legenda: Syringe pump (Overburden Pressure Control) – čerpadlo (kontrola nadložního tlaku), Temperature controlled bath – teplotně kontrovaná oblast, Inlet pressure – vstupní tlak, Outlet pressure – výstupní tlak, Core holder – držák jádra, Flow meter - průtokoměr, Syringe pump (Inlet gas pressure controll) – čerpadlo (kontrola tlaku výstupního plynu).

Další metodou je tzv. rtuťová porozimetrie (obr. 16). „Metoda založená na jevu kapilární deprese: při ponoření tuhého pórovitého materiálu do kapaliny, která jej špatně smáčí (rtuť), může kapalina vniknout do jeho pórů jen působením vnějšího tlaku. Z velikosti tlaku, kterého je zapotřebí ke vtlačení určitého objemu rtuť do pórů, je určován poloměr pórů. Mezi velikostí tlaku a nejmenším poloměrem pórů R , které jsou při tomto tlaku ještě zaplněny, platí Laplaceova-Youngova rovnice ve tvaru

$$\frac{p}{\rho g h} = \frac{2\gamma \cos \theta}{R} \quad (5.1)$$

kde γ je povrchové napětí rtuti, ρ - hustota rtuti, R - poloměr póru kruhového průřezu, g - tíhové zrychlení, h - výška sloupce rtuti v póru θ - úhel smáčení póru rtutí a p - celkový tlak, pod nímž rtuť vniká do póru. Každý přírůstek tlaku způsobí, že rtuť vnikne do další frakce pórů příslušně menšího poloměru, takže postupným zvyšováním tlaku a současným měřením objemu rtuti vtlačené do pórů lze zjistit rozdělení objemu pórů podle velikosti.

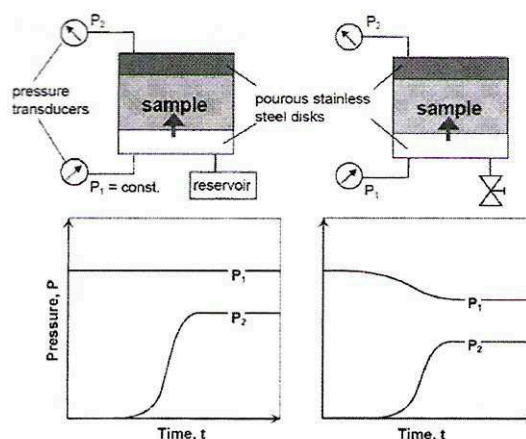
Uvedený vztah platí za několika zjednodušujících předpokladů:

- póry studovaného materiálu mají válcovitý tvar s pevnými stěnami, které se použitým tlakem nedeformují (předpoklad pravidelného válcovitého póru ovšem není v reálné tuhé látce splněn a veličina R má význam *efektivního poloměru*);
- je známa hodnota kontaktního úhlu
- povrchové napětí rtuti nezávisí na velikosti póru, do něhož byla rtuť vtlačena, ani na použitém tlaku. Fyzikální smysl povrchového napětí je zachován ještě pro póry s efektivním poloměrem 3,5 nm. Na tlaku závisí povrchové napětí rtuti velmi málo.“ [26]

Nejjednodušší postup spočívá v odvození hranice hodnoty prahového kapilárního tlaku z křivky porozimetrie rtuti, kdy známe hodnoty povrchového napětí plyn-voda, rtuť - vzduch ($\sigma_{\text{gas-water}}$, $\sigma_{\text{Hg - Air}} = 481 \text{ mN/m}$) a kontaktního úhlu pro fluidní systém ($\theta_{\text{gas-water}}$, $\theta_{\text{Hg-air}} = 140^\circ$) a uvažovanou horninu. Můžeme vyhodnotit práh kapilárního tlaku plyn-voda použitím rovnice

$$\frac{p}{\rho g h} = \frac{2\gamma \cos \theta}{R} \quad (5.2)$$

Hlavní výhodou této metody je rychlost jejího provedení a jednoduchost.

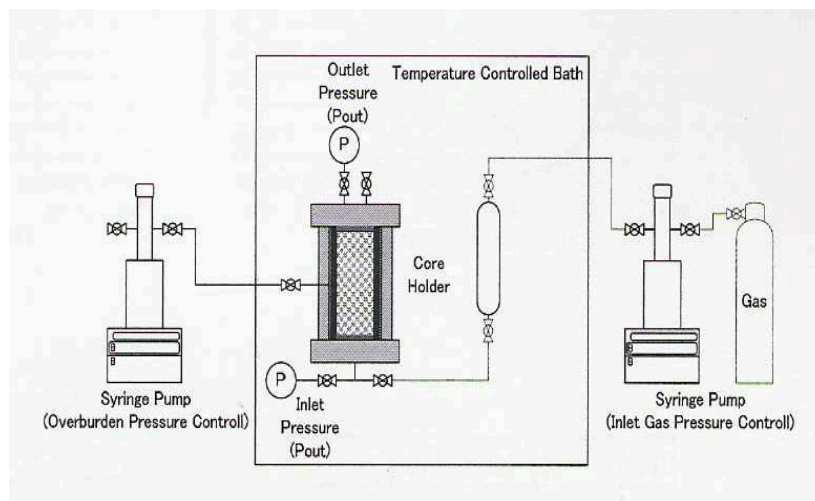


Obrázek 16 – Prahový kapilární tlak a rtuťová porosimetrie [9]

Legenda: Sample – vzorek, pressure transducers – tlakové snímače, reservoir – zásobník, porous stainless steel disks – porézní nerezovo-ocelové disk, pressure – tlak, time – čas.

Avšak Eggermann udává, že tento postup ignoruje vliv nadložního tlaku, poněvadž vzorky jsou stlačovány ze všech stran. Navíc, rtuťová porosimetrie vyžaduje vzorky suché, ale při vysušování se mění vlastnosti pórů vzorku.

Poslední metodou je tzv. postup zbytkového tlaku (obr. 17). Tento postup, navržený Hildenbrandem a kol., na měření prahu kapilárního tlaku je jednoduchý a snadný. Za prvé, jádro nasycené solným roztokem je vloženo do držáku jádra a natlačováno vstupním tlakem plynu nad očekávanou hodnotu u prahu kapilárního tlaku. Pak poklesne vstupní tlak a výstupní tlak vzroste prahem plynu. Nakonec, vstupní a výstupní tlak drží rovnováhu s určitým diferenciálním tlakem. V tomto postupu je interpretován tento diferenciální tlak jako práh kapilárního tlaku. Navíc, můžeme vyhodnotit maximálně efektivní propustnost plynu ze změny vstupního a výstupního tlaku na započtenou hodinu a vstupní a výstupní objem. Avšak, Zweigel a kol., uvádí, že práh kapilárního tlaku měřený tímto postupem je nižší než originální práh kapilárního tlaku vzhledem k hysterezi, proces se nazývá „snap-off“. Ve skutečnosti, Eggermann a kol. uvádí, že pro stejné vzorky je práh kapilárního tlaku měřený postupem zbytkového tlaku menší než měřený postupem „Standardní metoda“. Navíc poukázali, že maximální efektivní propustnost může být odlišná od skutečného maxima efektivní propustnosti, protože je to měřeno v čase, když diferenciální tlak napříč jádrem není větší při jeho maximální hodnotě.



Obrázek 17 – Schéma zbytkové metody [8]

Legenda: Syringe pump (Overburden Pressure Control) – čerpadlo (kontrola nadložního tlaku), Temperature controlled bath – teplotně kontrovaná oblast, Inlet pressure – vstupní tlak, Outlet pressure – výstupní tlak, Core holder – držák jádra, Gas - plyn, Syringe pump (Inlet gas pressure controll) – čerpadlo (kontrola tlaku výstupního plynu).

6. Experimentální měření

Mezi základní parametry důležité z hlediska chování horninového prostранství a pro uskladňování plynu za různých tlakových podmínek patří:

- objem pórů
- pórovitost
- hustota horninového prostředí
- permeabilita
- propustnost pro plyn a pro vodu

Pro posouzení uvedených vlastností jsme zvolili 3 horninové vzorky (vrtná jádra) z **hořického pískovce**, která jsou svým petrografickým složením vhodná pro podzemní zásobník plynu.

Makropopis: Celková barva horniny je světle hnědá. Jedná se o velmi jemnozrnný a rovnoměrně zrnitý psamit, Pouhým okem lze vidět křemenná zrna. Hornina je pórovitá a kompaktní.

Všechna měření byla provedena v Laboratoři simulace vrtů a ložisek uhlovodíků.

6.1 Měření pórovitosti a permeability

Tato měření proběhla na přístroji Automatický porosimetr a permeametr. Tento přístroj stanovuje následující veličiny, a to při stlačení vzorku až do 10 000 psi (cca 69 MPa):

- objem pórů V_p (cc)
- porositu vzorku ϕ (%)
- objem vzorku V_b (cc)
- objem rostlé části vzorku V_g (cc)
- propustnost pro plyn K_g (mD)
- hustota rostlé části vzorku G_d (g/cc)
- celková hustota vzorku B_d (g/cc)

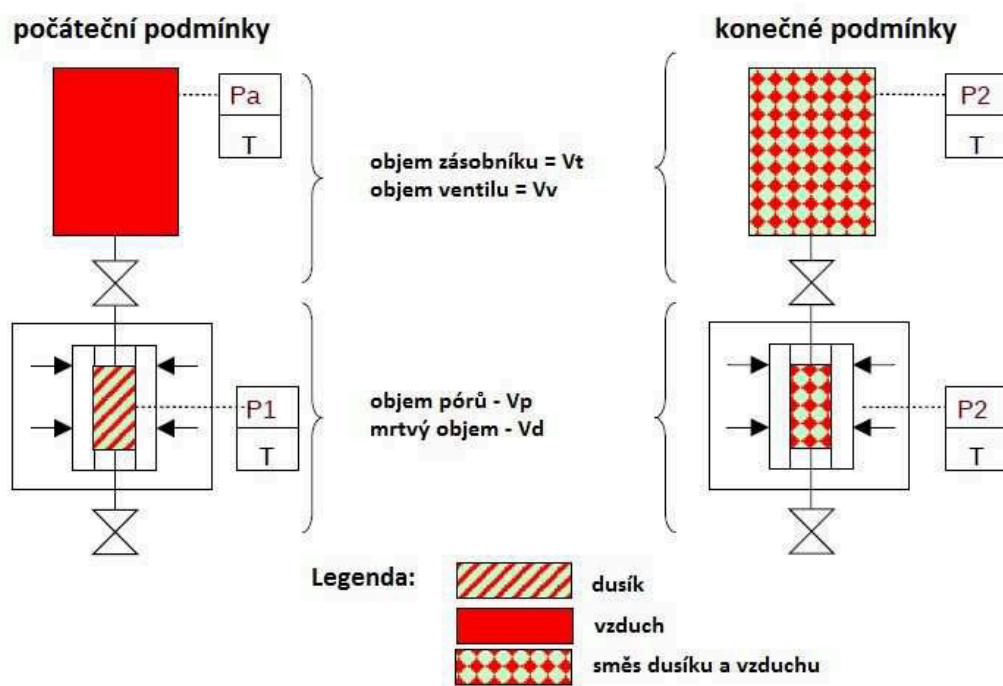
Je třeba si vysvětlit rozdíly mezi jednotlivými objemy:

- objem vzorku = zdánlivý objem vzorku
- objem rostlé části vzorku = objem všech zrn, ze kterých je vzorek složen
- celkový objem pórů = objem volného prostoru vzorku
- efektivní objem pórů = objem komunikujících prostor vzorku

6.1.1 Stanovení pórovitosti

Měření na automatickém porosimetru probíhá na základě metod pro neustálené prostředí. Tehdy je objem pórů stanoven pomocí Boylova zákona, pro stanovení permeability vychází z Darcyho zákona.

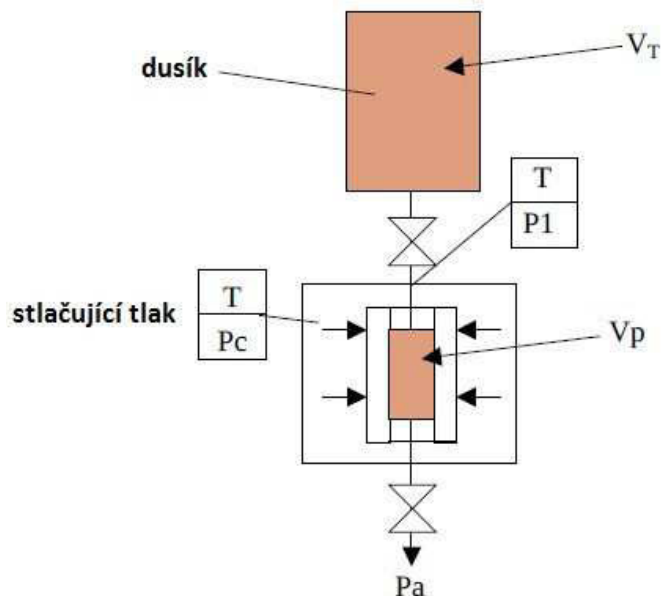
Přístroj pracuje na základě tzv. Boyle's Law Single Cell Method pro měření volného prostoru (obr. 18). Objem pórů se stanovuje díky referenční nádobě naplněné plynem o referenčním objemu a počátečním tlaku, který je přepuštěn do pórového prostoru daného vzorku. Vzorek se umístí do jádrovnicového držáku a upevní se elastickou manžetou, která vyvozuje izostatický stlačovací tlak (napětí). Celý proces je izotermický.



Obrázek 18 – Schéma Automatického porozimetru [21]

6.1.2 Stanovení permeability

Měření permeability na automatickém porozimetru a permeamtru vychází z fixního objemu plynu v zásobníku, který je umístěn v blízkosti vzorku (obr. 19). Ze zásobníku plyn proudí do vzorku, kde je následně změřen. Tlakový pokles zařízení využívá protisměrný plynový manifold. A to tím způsobem, že je napojený na držák vzorku schopný uplatnit hydrostatické napětí na válcovém vzorku o průměru D a délce L . Tento způsob měření permeability má rozsah od 0,001 do 5 000 mD.



Obrázek 19 – Schéma permeamtru [21]

6.2 Vlastní laboratorní měření

6.2.1 Postup měření

Na počátku měření jsme se rozhodli pro tyto podmínky:

- maximalizační stabilizační čas pro porositu $\phi_{\max} = 157$ s
- maximální čas pro tlakový pokles $K_{\max} = 100$ s
- počáteční tlak užitý pro porovitost $\phi_{\text{press}} = 100$ psi (7 bar)
- boční tlak $p = 3000$ psi (207 bar)

Následná měření pak měla za úkol stanovit hysterezní křivky pro různá konstantní stlačení. Cílem bylo zjistit chování měřených veličin při konstantně narůstajícím či klesajícím tlaku. Pro vykreslení hysterezních křivek byl stanoven tlakový krok:

600 psi → 1000 psi → 1500 psi → 2000 psi → 2500 psi → 3000 psi → 2500 psi
→ 2000 psi → 1500 psi → 1000 psi → 600 psi

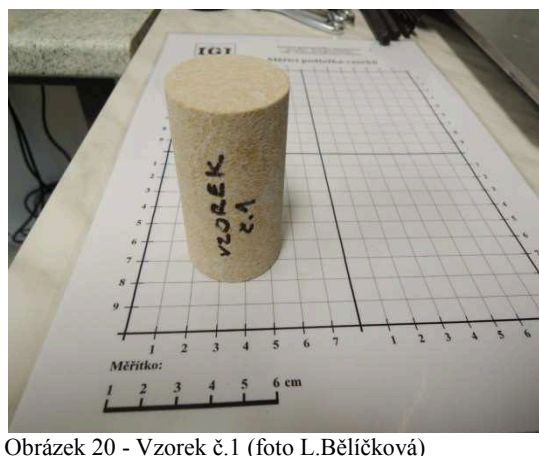
Mezi jednotlivými měřeními byla vždy časová prodleva alespoň 24 hod.

6.3 Stanovení fyzikálně – petrografických parametrů vzorku č.1

Parametry vzorku č. 1:

- průměr $d = 37,7 \text{ mm}$
- délka $l = 62,8 \text{ mm}$
- hmotnost $m = 136,50 \text{ g}$

Při prvním měření jsme stanovili, že vzorek č. 1 bude stlačen na hodnotu 3000 psi (207 bar). Výsledky tohoto měření jsou uvedeny v tabulce č. 1.



Obrázek 20 - Vzorek č.1 (foto L.Bělíčková)

Tabulka 1 - Stanovení parametrů vzorku č.1

stlačení p	propustnost pro vzduch (N ₂) K[mD]	objem pórů V _p [cc]	pórovitost [%]	objem vzorku V _b [cc]	objem rostlé části vzorku V _g [cc]	hustota vzorku B _d [cc]	hustota rostlé části vzorku G _d [cc]
3000,00	317,40	18,14	25,96	69,88	51,73	1,95	2,64

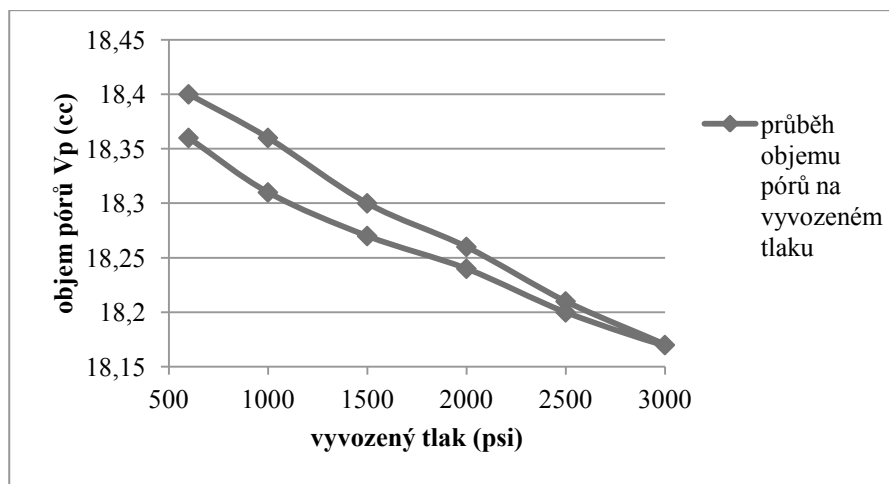
6.3.1 Stanovení hysterezních křivek jádra č. 1

Stanovení proběhlo na základě měření daných veličin v tlakovém rozpětí 600 psi – 3000 psi (41 bar – 207 bar).

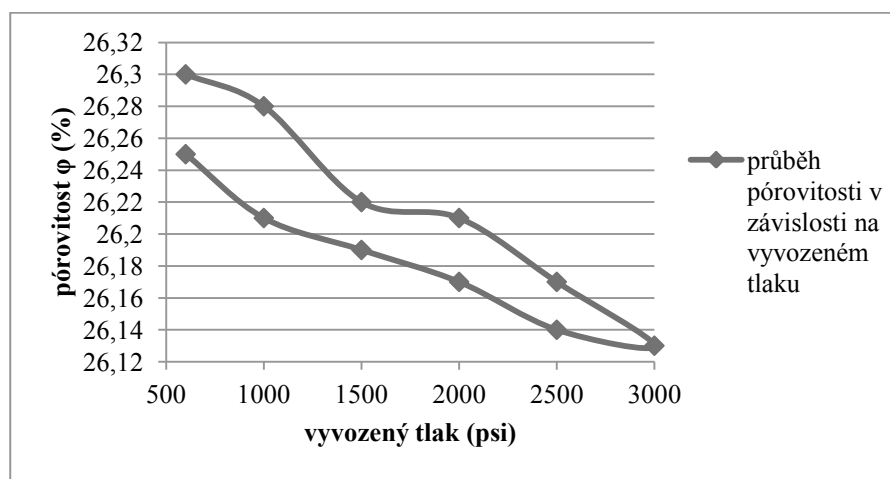
Před prvním měření byla hmotnost jádra č. 1: 136,50 g.

Po sérii měření hmotnost jádra č. 1 byla: 136, 48 g.

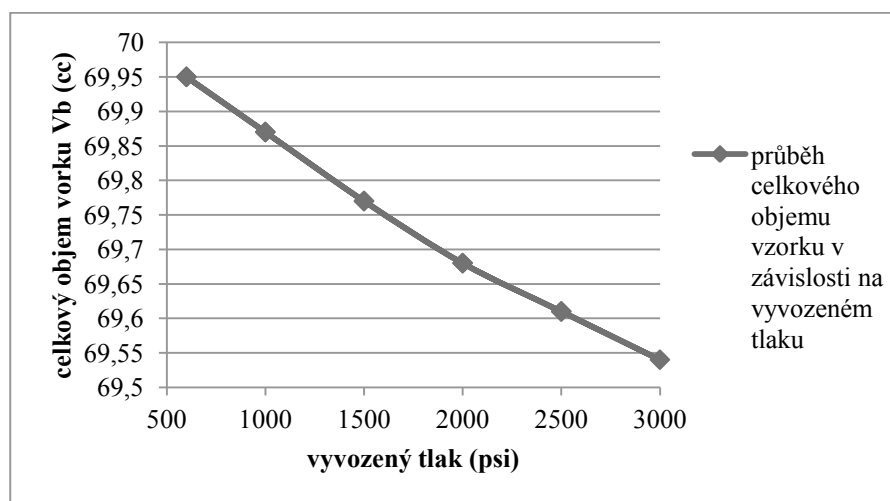
Graf 1 – Hysterezní křivka průběhu objemu pórů na vyvozeném tlaku



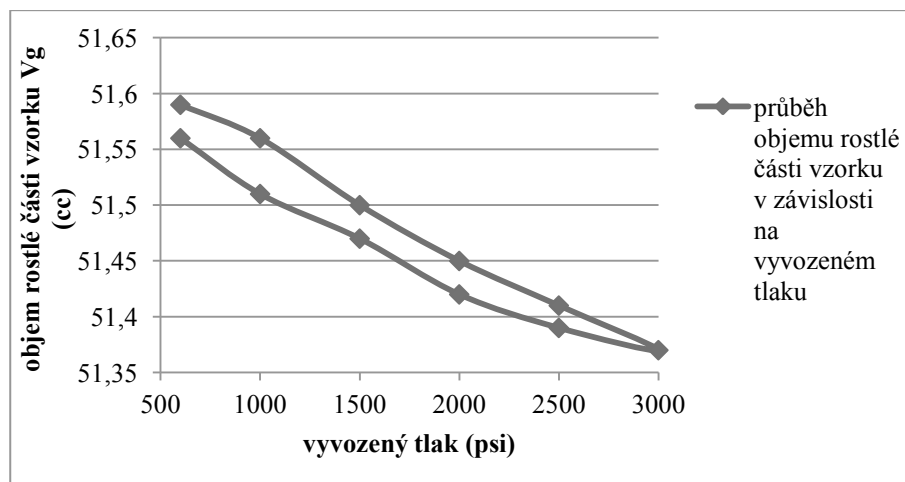
Graf 2 - Hysterezní křivka průběhu pórovitosti na vyvozeném tlaku



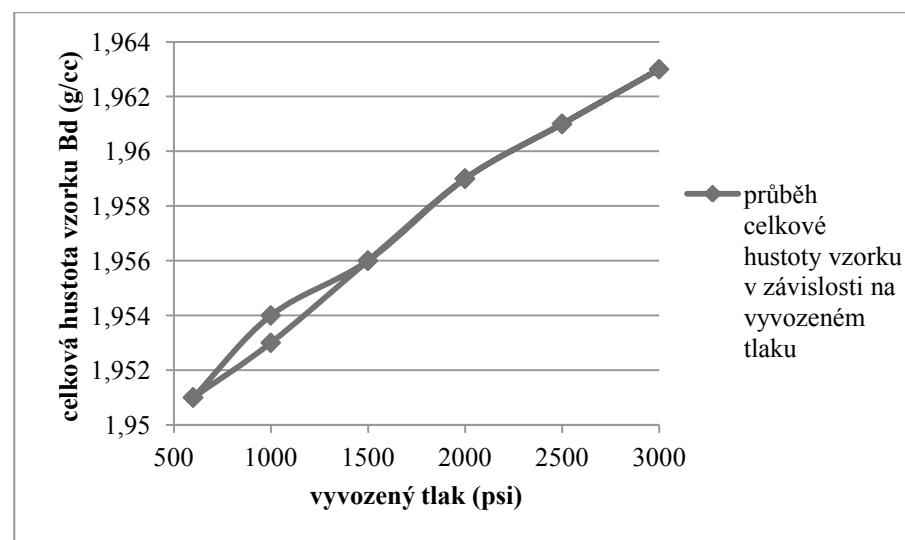
Graf 3 - Hysterezní křivka průběhu celkového objemu na vyvozeném tlaku



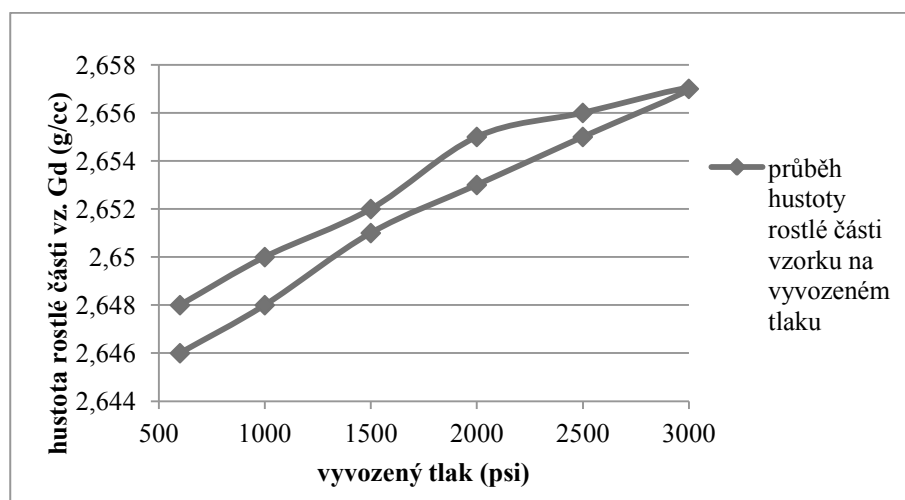
Graf 4 - Hysterezní křivka průběhu rostlé části na vyvozeném tlaku



Graf 5 - Hysterezní křivka průběhu celkové hustoty na vyvozeném tlaku



Graf 6 - Hysterezní křivka průběhu rostlé části na vyvozeném tlaku

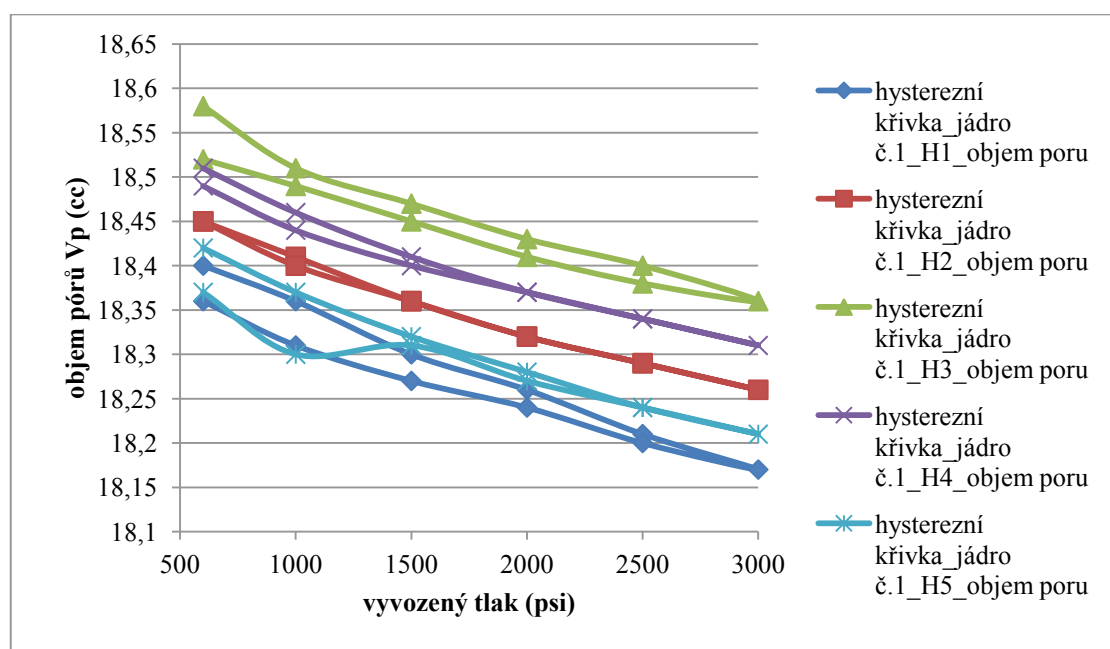


Srovnání hysterezních křivek:

Tabulka 2 – Vývoj objemu pórů V_p v závislosti na vyvozeném tlaku p

tlak p (psi)	600	1000	1500	2000	2500	3000	2500	2000	1500	1000	600
hystereze č.1	18,4	18,36	18,3	18,26	18,21	18,17	18,2	18,24	18,27	18,31	18,36
hystereze č.2	18,45	18,41	18,36	18,32	18,29	18,26	18,29	18,32	18,36	18,4	18,45
hystereze č.3	18,52	18,49	18,45	18,41	18,38	18,36	18,4	18,43	18,47	18,51	18,58
hystereze č.4	18,51	18,46	18,41	18,37	18,34	18,31	18,34	18,37	18,4	18,44	18,49
hystereze č.5	18,42	18,37	18,32	18,28	18,24	18,21	18,24	18,27	18,31	18,3	18,37

Graf 7 – Srovnání hysterezních křivek průběhu objemu pórů na vyvozeném tlaku

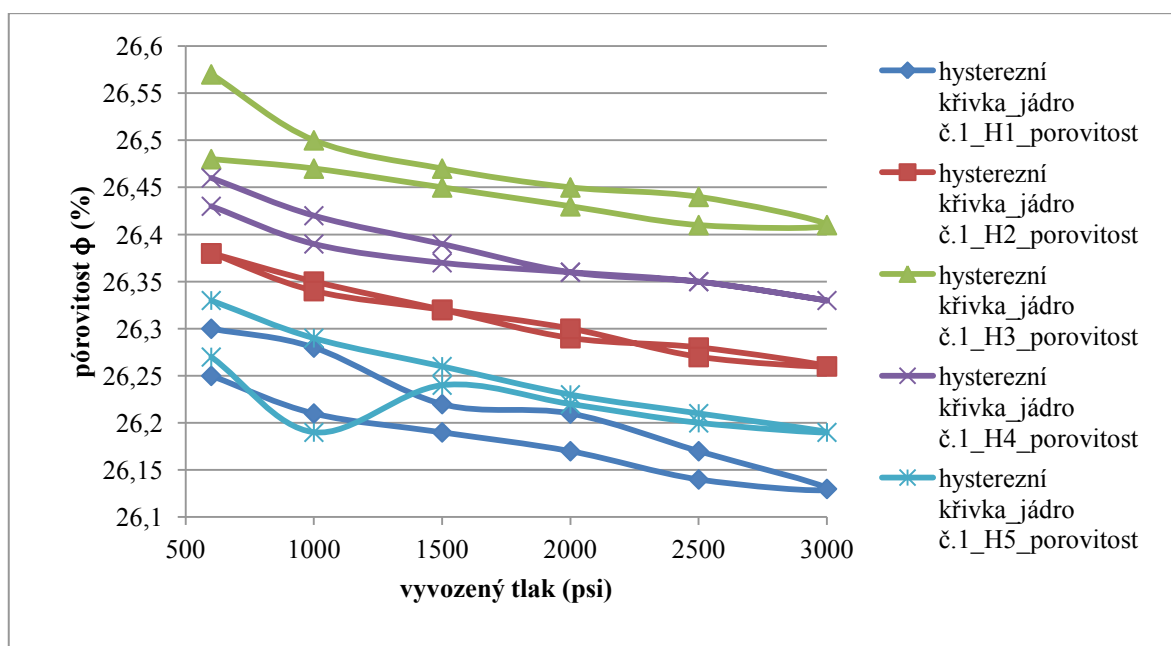


Srovnání prvního měření s ostatními napovídá, že uvnitř vzorku horniny došlo ke změnám vnitřní struktury a pravděpodobně i k uvolnění části materiálu, který ve vzorku migroval, a tím změnil průběh křivek. Jedná se však jen o malou změnu, v řádu desetinného čísla.

Tabulka 3 - Vývoj pórovitosti ϕ v závislosti na vyvozeném tlaku p

tlak p (psi)	600	1000	1500	2000	2500	3000	2500	2000	1500	1000	600
hystereze č.1	26,3	26,28	26,22	26,21	26,17	26,13	26,14	26,17	26,19	26,21	26,25
hystereze č.2	26,38	26,35	26,32	26,29	26,28	26,26	26,27	26,3	26,32	26,34	26,38
hystereze č.3	26,48	26,47	26,45	26,43	26,41	26,41	26,44	26,45	26,47	26,5	26,57
hystereze č.4	26,46	26,42	26,39	26,36	26,35	26,33	26,35	26,36	26,37	26,39	26,43
hystereze č.5	26,33	26,29	26,26	26,23	26,21	26,19	26,2	26,22	26,24	26,19	26,27

Graf 8 – Srovnání hysterézních křivek průběhu pórovitosti na vyvozeném tlaku

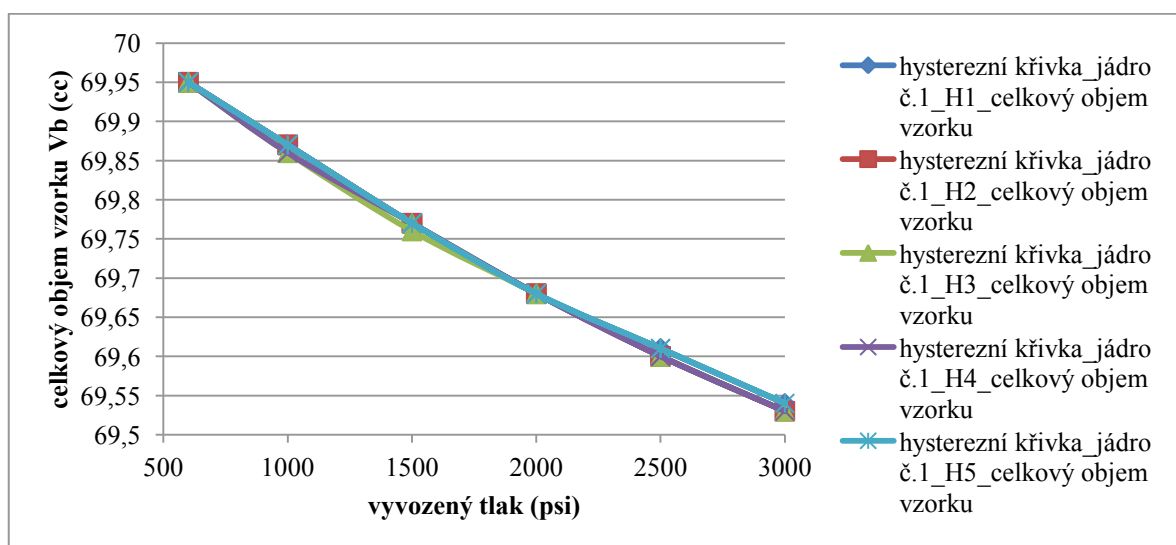


Pokud porovnáme průběh hysterézních křivek pórovitosti, vidíme, že také zde došlo k vnitřním změnám.

Tabulka 4 - Vývoj celkového objemu V_b v závislosti na vyvozaném tlaku p

tlak p (psi)	600	1000	1500	2000	2500	3000	2500	2000	1500	1000	600
hystereze č.1	69,95	69,87	69,77	69,68	69,61	69,54	69,61	69,68	69,77	69,87	69,95
hystereze č.2	69,95	69,87	69,77	69,68	69,6	69,53	69,6	69,68	69,77	69,87	69,95
hystereze č.3	69,95	69,86	69,77	69,68	69,6	69,53	69,6	69,68	69,76	69,86	69,95
hystereze č.4	69,95	69,86	69,77	69,68	69,6	69,53	69,6	69,68	69,77	69,87	69,95
hystereze č.5	69,95	69,87	69,77	69,68	69,61	69,54	69,61	69,68	69,77	69,87	69,95

Graf 9 – Srovnání hysterézních křivek průběhu celkového objemu na vyvozeném tlaku

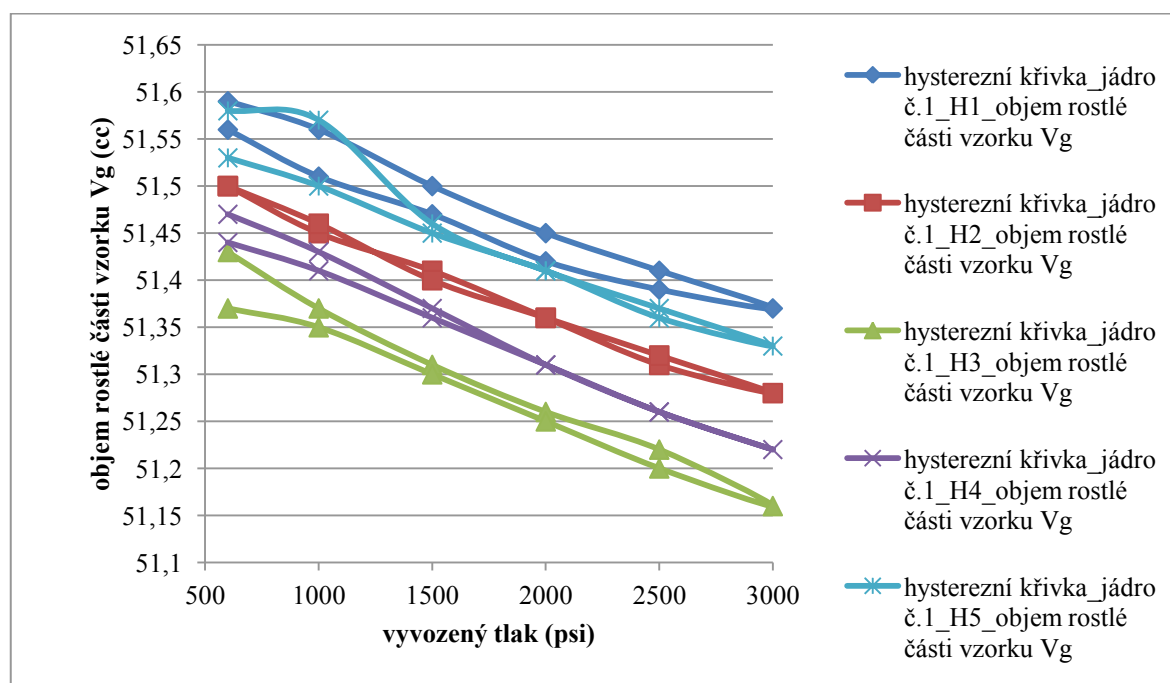


Hysterezní křivky všech pěti měření jsou téměř totožné. S narůstajícím bočním stlačením se celkový objem zmenšoval, a naopak, při postupném snižování bočního tlaku docházelo k nabírání ztraceného objemu.

Tabulka 5 - Vývoj objemu rostlé části V_g v závislosti na vyvozaném tlaku p

tlak p (psi)	600	1000	1500	2000	2500	3000	2500	2000	1500	1000	600
hystereze č.1	51,56	51,51	51,47	51,42	51,39	51,37	51,41	51,45	51,5	51,56	51,59
hystereze č.2	51,5	51,45	51,41	51,36	51,31	51,28	51,32	51,36	51,4	51,46	51,5
hystereze č.3	51,43	51,37	51,31	51,26	51,22	51,16	51,2	51,25	51,3	51,35	51,37
hystereze č.4	51,44	51,41	51,36	51,31	51,26	51,22	51,26	51,31	51,37	51,43	51,47
hystereze č.5	51,53	51,5	51,45	51,41	51,36	51,33	51,37	51,41	51,46	51,57	51,58

Graf 10 – Srovnání hysterezních křivek průběhu objemu rostlé části na vyvozaném tlaku

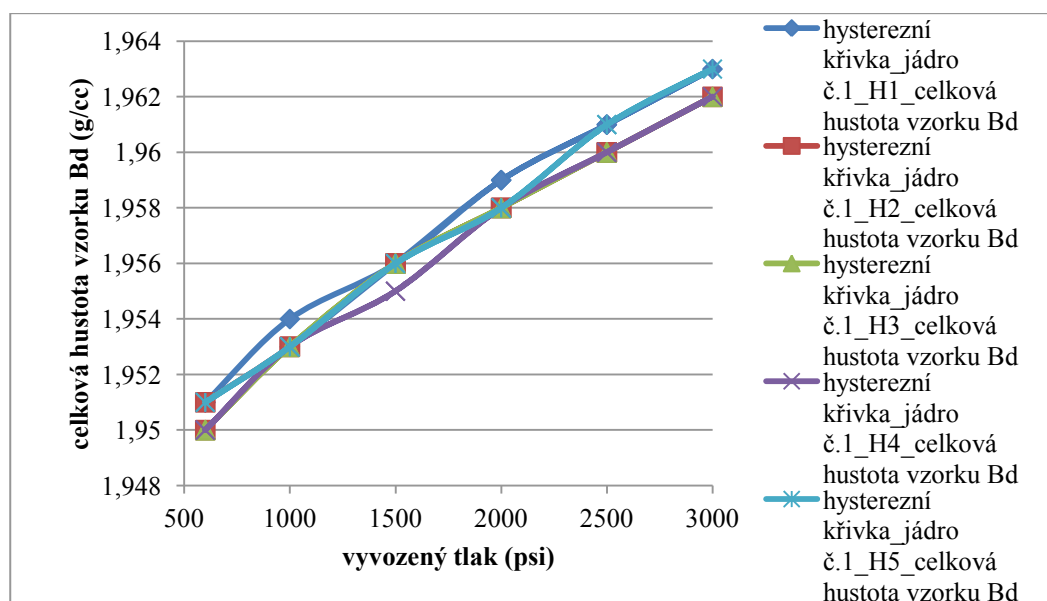


Křivky všech měření jsou tvarově velmi podobné a vykazují velmi podobný průběh, který se liší až na druhém desetinném místě.

Tabulka 6 - Vývoj celkové hustoty B_d v závislosti na vyvozaném tlaku p

tlak p (psi)	600	1000	1500	2000	2500	3000	2500	2000	1500	1000	600
hystereze č.1	1,951	1,953	1,956	1,959	1,961	1,963	1,961	1,959	1,956	1,954	1,951
hystereze č.2	1,95	1,953	1,956	1,958	1,96	1,962	1,96	1,958	1,956	1,953	1,951
hystereze č.3	1,95	1,953	1,956	1,958	1,96	1,962	1,96	1,958	1,956	1,953	1,95
hystereze č.4	1,95	1,953	1,955	1,958	1,96	1,962	1,96	1,958	1,955	1,953	1,95
hystereze č.5	1,951	1,953	1,956	1,958	1,961	1,963	1,961	1,958	1,956	1,953	1,951

Graf 11 – Srovnání hysterezních křivek průběhu celkové hustoty na vyvozeném tlaku

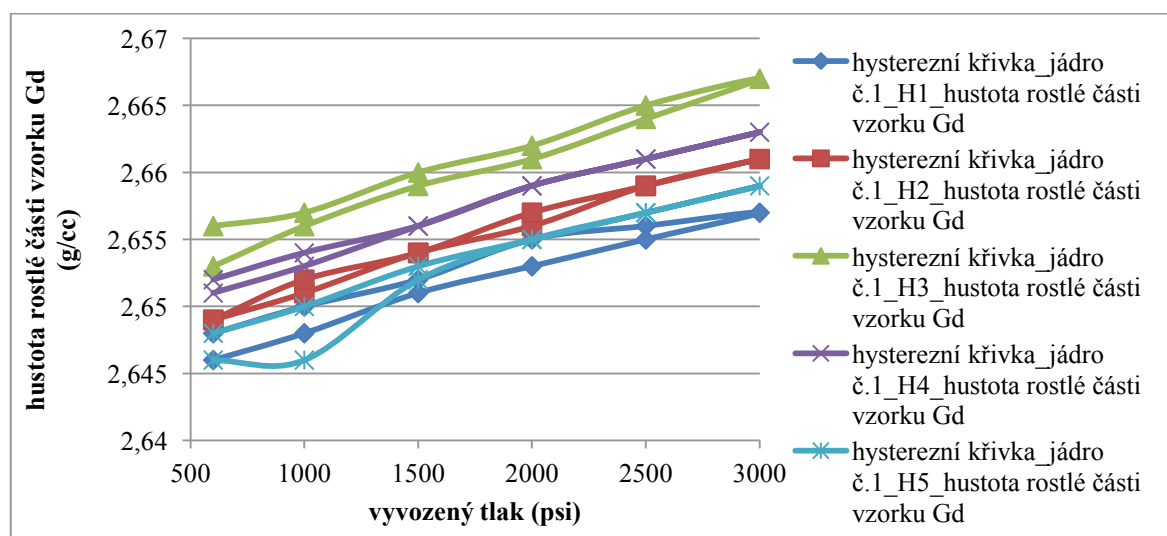


Změny ve vývoji celkové hustoty vrtného jádra jsou minimální, víceméně korespondují s průběhem křivek celkového objemu vzorku. Hodnoty všech pěti měření se ustálily na přibližně stejných hodnotách.

Tabulka 7 - Vývoj hustoty rostlé části G_d v závislosti na vyvozeném tlaku p

tlak p (psi)	600	1000	1500	2000	2500	3000	2500	2000	1500	1000	600
hystereze č.1	2,648	2,65	2,652	2,655	2,656	2,657	2,655	2,653	2,651	2,648	2,646
hystereze č.2	2,649	2,651	2,654	2,656	2,659	2,661	2,659	2,657	2,654	2,652	2,649
hystereze č.3	2,653	2,656	2,659	2,661	2,664	2,667	2,665	2,662	2,66	2,657	2,656
hystereze č.4	2,652	2,654	2,656	2,659	2,661	2,663	2,661	2,659	2,656	2,653	2,651
hystereze č.5	2,648	2,65	2,653	2,655	2,657	2,659	2,657	2,655	2,652	2,646	2,646

Graf 12 – Srovnání hysterezních křivek průběhu hustoty rostlé části na vyvozeném tlaku



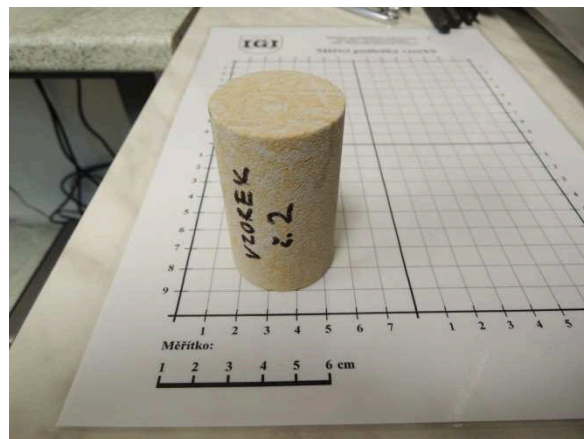
Hustota rostlé části horninového vzorku je vyšší než hustota celého vzorku. Průměrná hodnota hustoty rostlé části G_d je 2,655 g/cc. Změny se objevují až na druhé či třetím desetinném místě.

6.4 Stanovení fyzikálně – petrografických parametrů vzorku č. 2

Parametry vzorku č. 2:

- průměr $d = 37,6$ mm
- délka $l = 62,7$ mm
- hmotnost $m = 133,86$ g

Při prvním měření jsme stanovili, že vzorek č. 2 bude stlačen na hodnotu 3000 psi (207 bar). Výsledky tohoto měření jsou uvedeny v tabulce č. 2



Obrázek 21 – Vzorek č.2 (foto L.Bělíčková)

Tabulka 8 - Stanovení parametrů vzorku č.2

stlačení p	propustnost pro vzduch (N ₂) K[mD]	objem pórů V_p [cc]	pórovitost [%]	objem vzorku V_b [cc]	objem rostlé části vzorku V_g [cc]	hustota vzorku B_d [cc]	hustota rostlé části vzorku G_d [cc]
3000,00	608,28	18,23	26,4	69,05	50,83	1,94	2,63

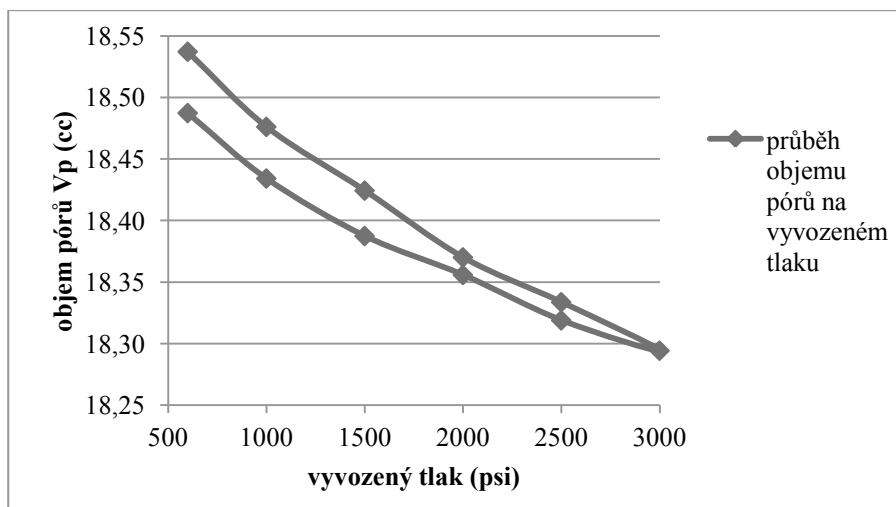
6.4.1 Stanovení hysterezních křivek jádra č. 2

Stanovení proběhlo na základě měření daných veličin v tlakovém rozpětí 600 psi – 3000 psi (41 bar – 207 bar).

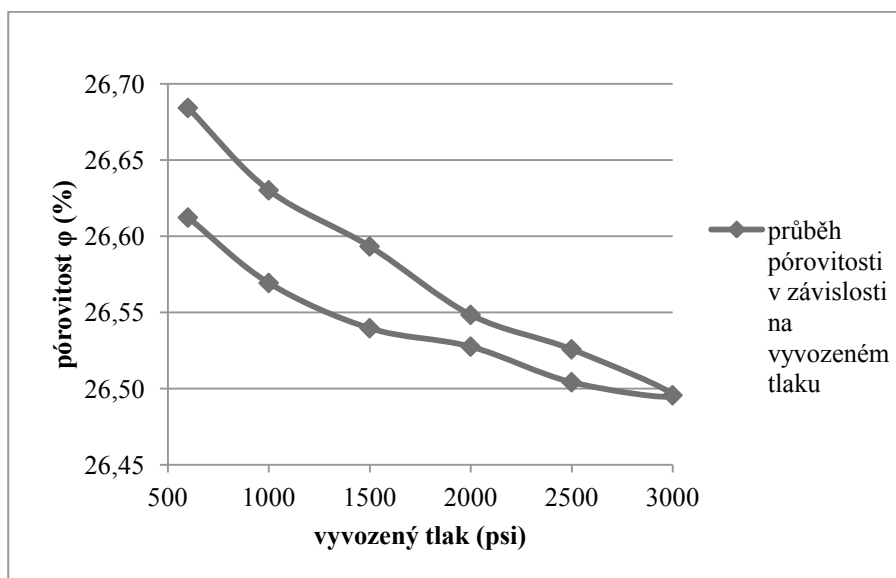
Před prvním měření byla hmotnost jádra č. 2: 133,79 g.

Po sérii měření hmotnost jádra č. 2 byla: 133, 72 g.

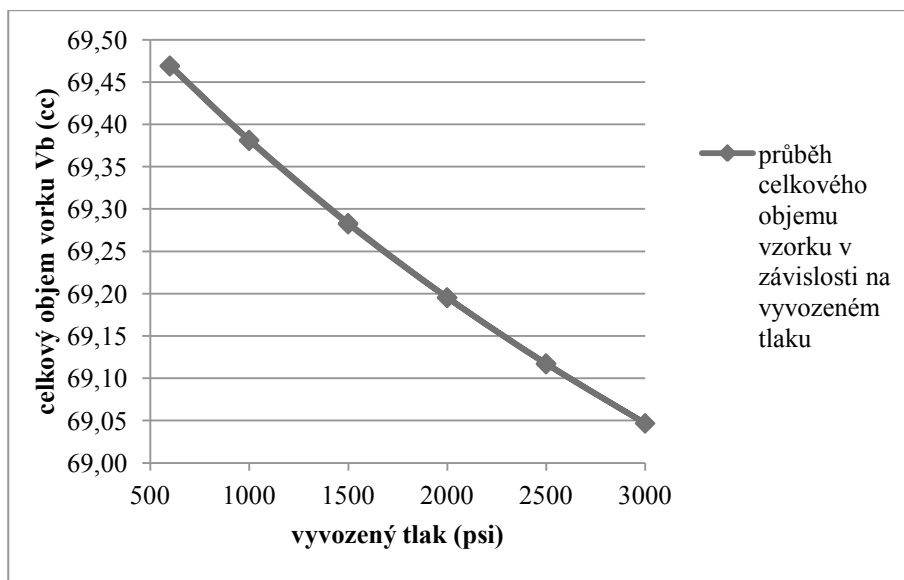
Graf 13 - Hysterezní křivka průběhu objemu pórů na vyvozeném tlaku



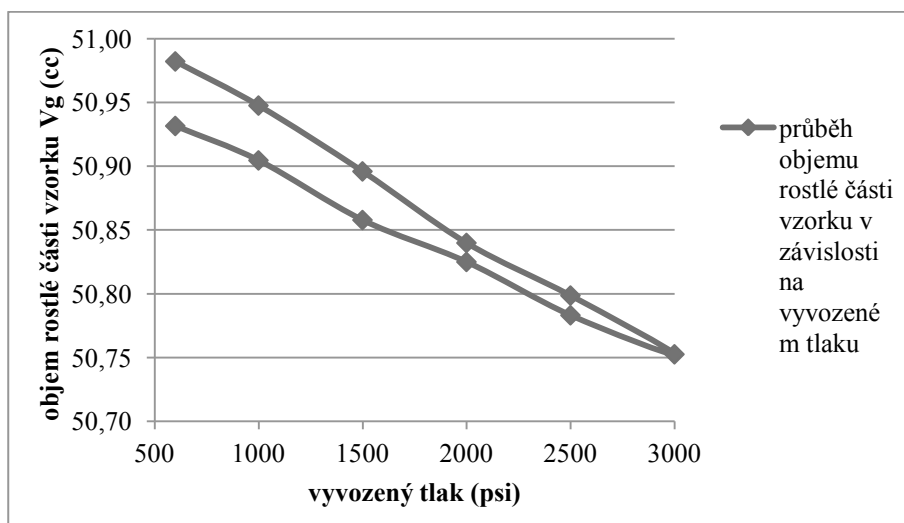
Graf 14 - Hysterezní křivka průběhu pórovitosti na vyvozeném tlaku



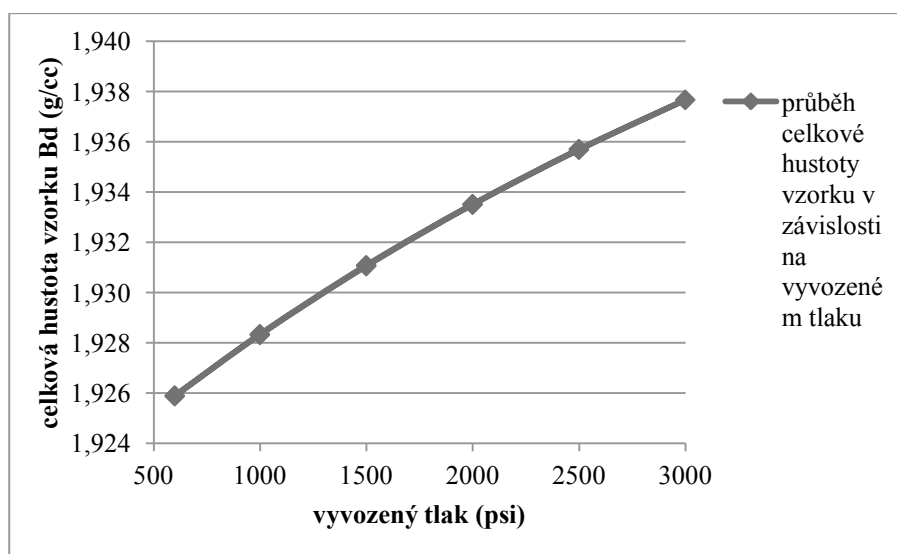
Graf 15 - Hysterezní křivka průběhu celkového objemu na vyvozeném tlaku



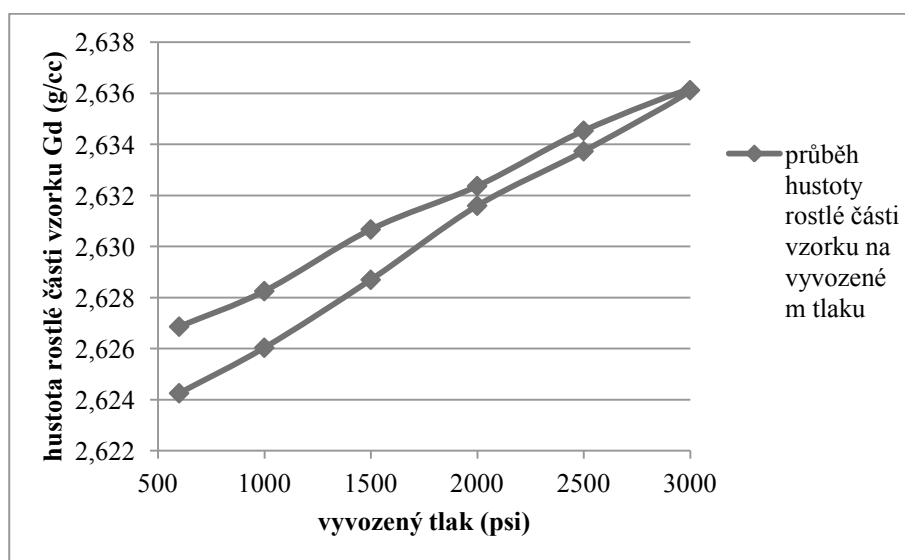
Graf 16 - Hysterezní křivka průběhu objemu rostlé části na vyvozeném tlaku



Graf 17 - Hysterezní křivka průběhu celkové hustoty na vyvozeném tlaku



Graf 18 - Hysterezní křivka průběhu hustoty rostlé části na vyvozeném tlaku

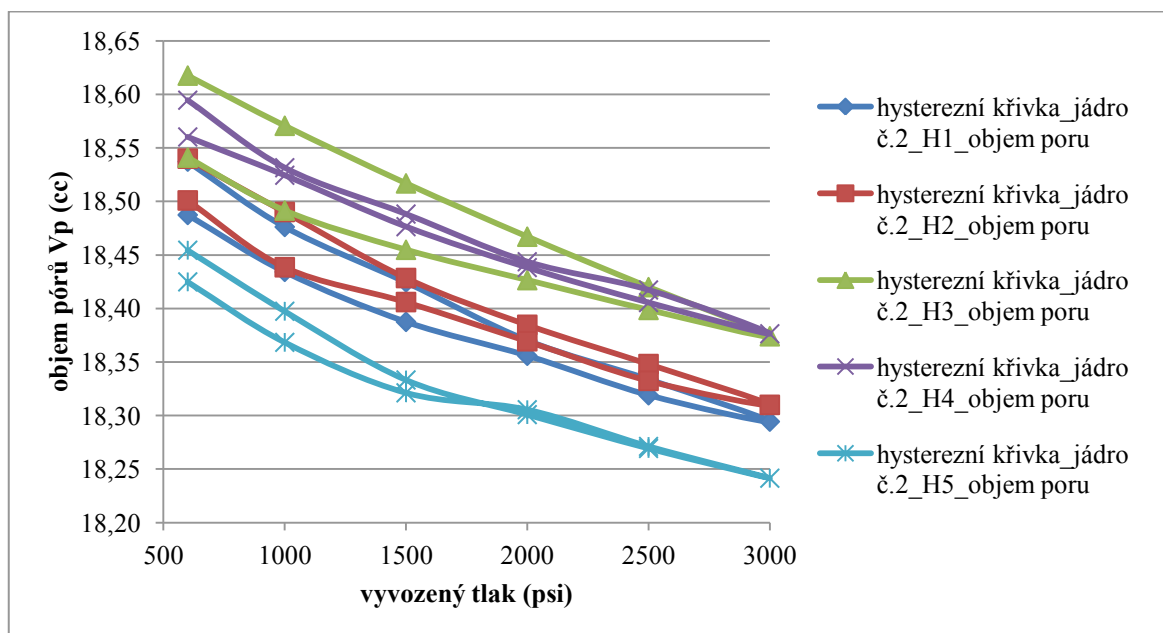


Srovnání hysterezních křivek:

Tabulka 9 - Vývoj objemu pórů V_p v závislosti na vyvozovaném tlaku p

tlak p (psi)	600	1000	1500	2000	2500	3000	2500	2000	1500	1000	600
hystereze č.1	18,54	18,48	18,42	18,37	18,33	18,29	18,32	18,36	18,39	18,43	18,49
hystereze č.2	18,54	18,49	18,43	18,38	18,35	18,31	18,33	18,37	18,41	18,44	18,50
hystereze č.3	18,62	18,57	18,52	18,47	18,42	18,37	18,40	18,43	18,45	18,49	18,54
hystereze č.4	18,56	18,52	18,48	18,44	18,41	18,38	18,42	18,44	18,49	18,53	18,59
hystereze č.5	18,45	18,40	18,33	18,30	18,27	18,24	18,27	18,31	18,32	18,37	18,42

Graf 19 - Srovnání hysterezních křivek průběhu objemu pórů na vyvozeném tlaku

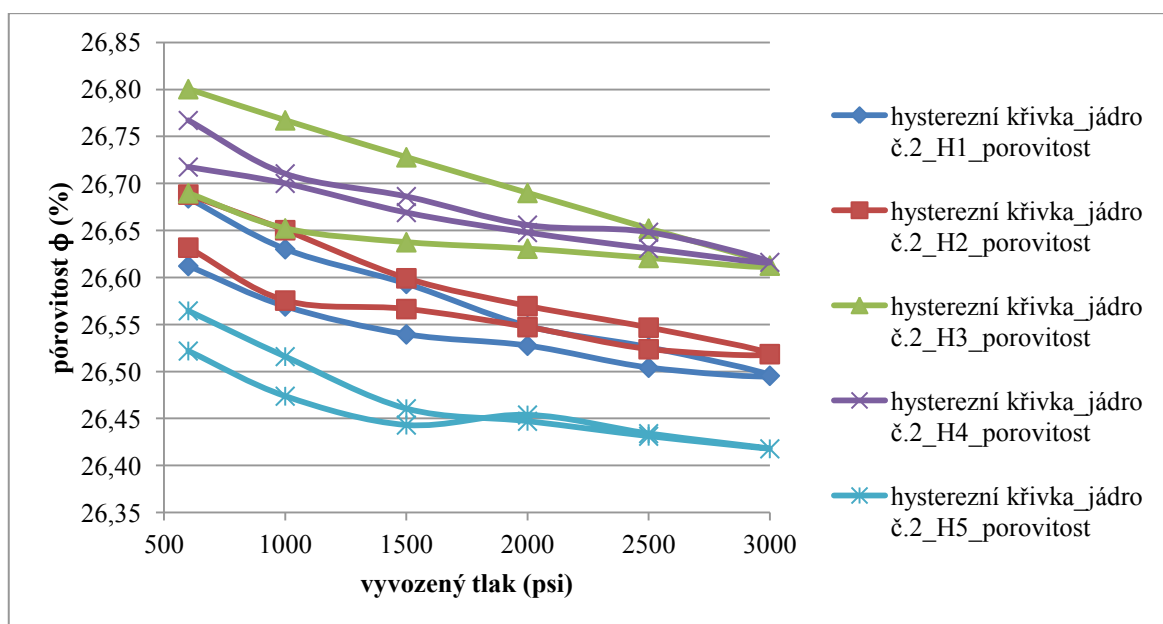


Srovnání měření objemu pórů druhého vzorku s prvním vzorkem ukazuje téměř totožný průběh křivek. Jedná se zde jen o malé změny, v řádech desetinného až setinného čísla.

Tabulka 10 - Vývoj pórovitosti ϕ v závislosti na vyvozovaném tlaku p

tlak p (psi)	600	1000	1500	2000	2500	3000	2500	2000	1500	1000	600
hystereze č.1	26,68	26,63	26,59	26,55	26,53	26,50	26,50	26,53	26,54	26,57	26,61
hystereze č.2	26,69	26,65	26,60	26,57	26,55	26,52	26,52	26,55	26,57	26,58	26,63
hystereze č.3	26,80	26,77	26,73	26,69	26,65	26,61	26,62	26,63	26,64	26,65	26,69
hystereze č.4	26,72	26,70	26,67	26,65	26,63	26,62	26,65	26,66	26,69	26,71	26,77
hystereze č.5	26,56	26,52	26,46	26,45	26,43	26,42	26,43	26,45	26,44	26,47	26,52

Graf 20 - Srovnání hysterezních křivek průběhu pórovitosti na vyvozeném tlaku

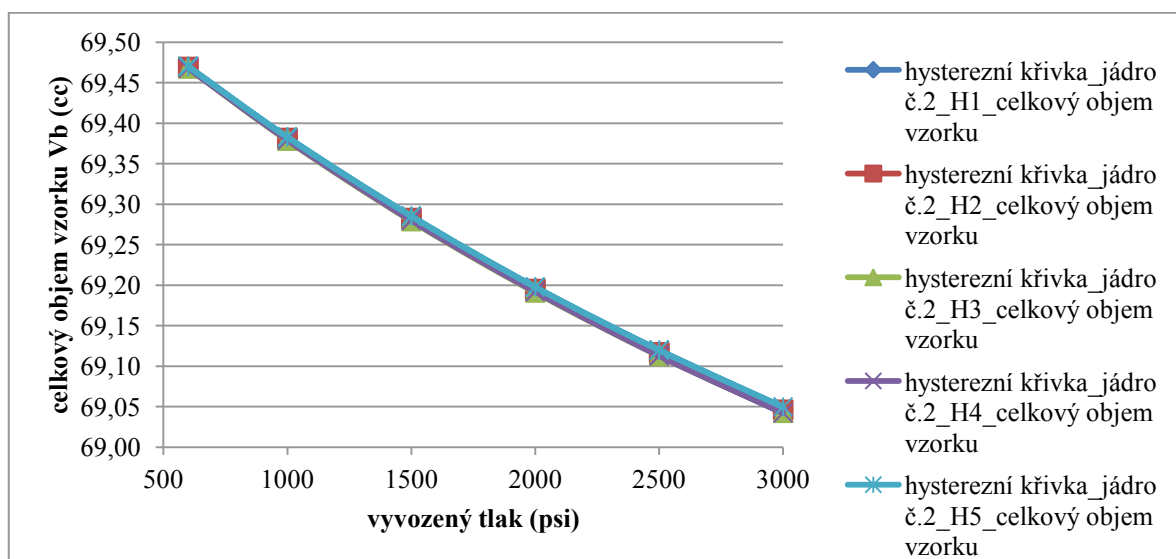


Po sérii měření došlo ke snížení pórovitosti horninového vzorku.

Tabulka 11 - Vývoj celkového objemu vzorku V_b v závislosti na vyvozeném tlaku p

tlak p (psi)	600	1000	1500	2000	2500	3000	2500	2000	1500	1000	600
hystereze č.1	69,47	69,38	69,28	69,20	69,12	69,05	69,12	69,20	69,28	69,38	69,47
hystereze č.2	69,47	69,38	69,28	69,19	69,12	69,05	69,12	69,20	69,28	69,38	69,47
hystereze č.3	69,47	69,38	69,28	69,19	69,11	69,04	69,11	69,19	69,28	69,38	69,47
hystereze č.4	69,47	69,38	69,28	69,19	69,11	69,04	69,11	69,19	69,28	69,38	69,47
hystereze č.5	69,47	69,38	69,29	69,20	69,12	69,05	69,12	69,20	69,29	69,38	69,47

Graf 21 - Srovnání hysterezních křivek průběhu celkového objemu na vyvozeném tlaku

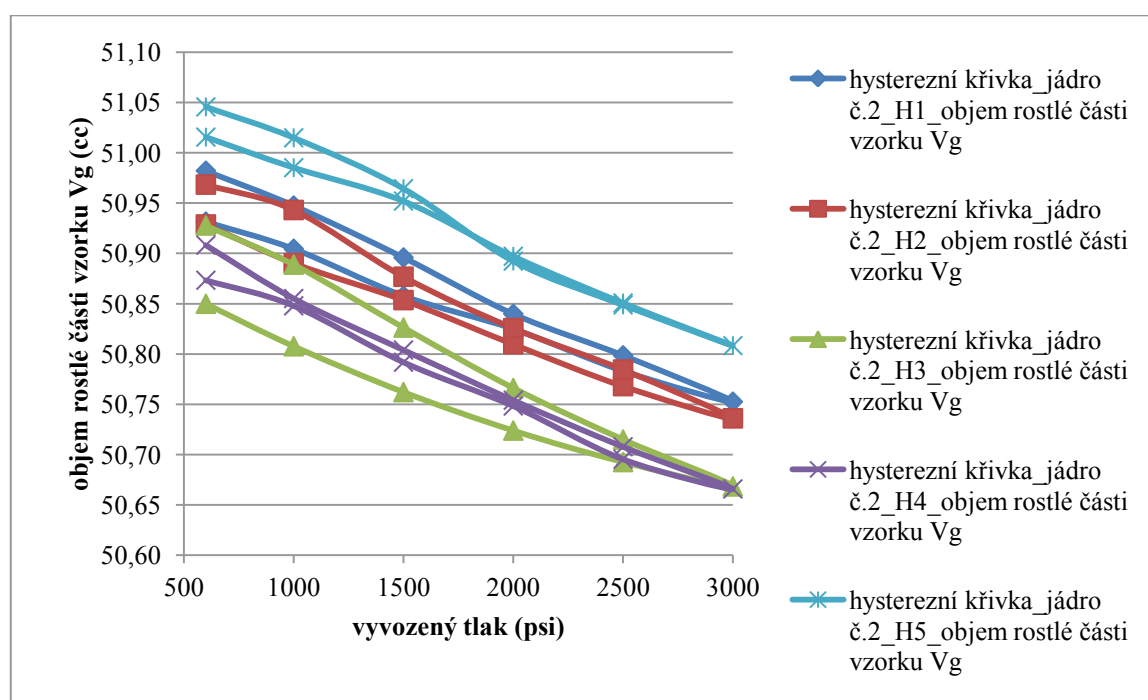


Průběh všech pěti křivek po sérii měření je totožný, nedošlo k žádným změnám v celkovém objemu vzorku.

Tabulka 12 - Vývoj objemu rostlé části V_g v závislosti na vyvozaném tlaku p

tlak p (psi)	600	1000	1500	2000	2500	3000	2500	2000	1500	1000	600
hystereze č.1	50,93	50,90	50,86	50,82	50,78	50,75	50,80	50,84	50,90	50,95	50,98
hystereze č.2	50,93	50,89	50,85	50,81	50,77	50,74	50,78	50,83	50,88	50,94	50,97
hystereze č.3	50,85	50,81	50,76	50,72	50,69	50,67	50,71	50,77	50,83	50,89	50,93
hystereze č.4	50,91	50,86	50,80	50,75	50,71	50,67	50,70	50,75	50,79	50,85	50,87
hystereze č.5	51,02	50,99	50,95	50,90	50,85	50,81	50,85	50,89	50,96	51,01	51,05

Graf 22 - Srovnání hysterezních křivek průběhu objemu rostlé části na vyvozaném tlaku

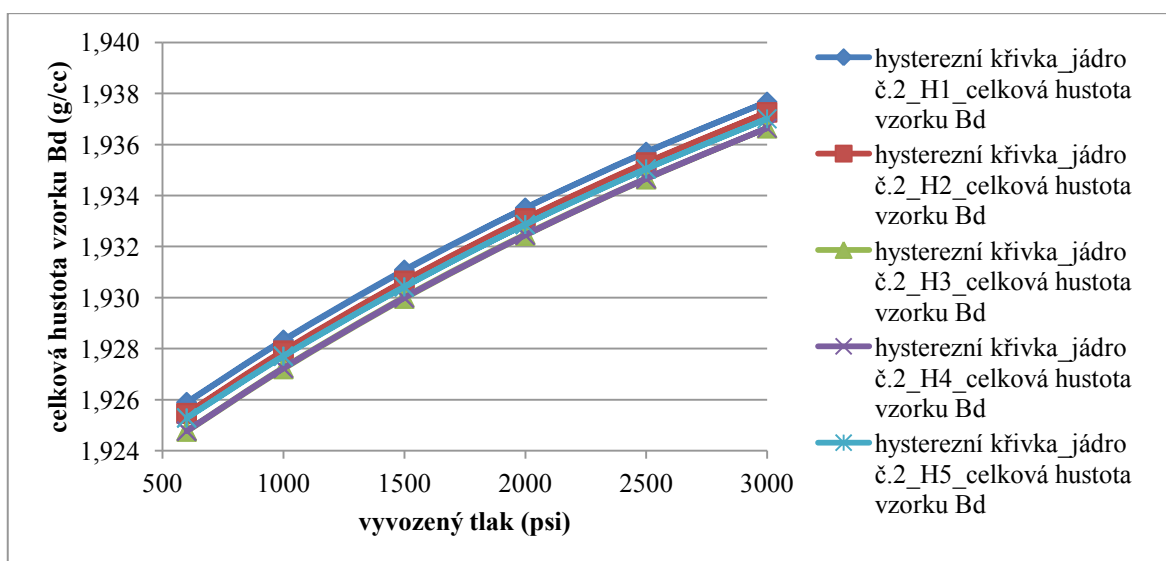


Pro každou sérii měření lze vysledovat téměř stejný průběh. Rozdíl mezi prvním a posledním měřením je pouze 0,06 g/cc. Průměrný objem rostlé části vzorku je 50,84 cc.

Tabulka 13 - Vývoj celkové hustoty B_d v závislosti na vyvozaném tlaku p

tlak p (psi)	600	1000	1500	2000	2500	3000	2500	2000	1500	1000	600
hystereze č.1	1,926	1,928	1,931	1,934	1,936	1,938	1,936	1,934	1,931	1,928	1,926
hystereze č.2	1,925	1,928	1,931	1,933	1,935	1,937	1,935	1,933	1,931	1,928	1,925
hystereze č.3	1,925	1,927	1,930	1,932	1,935	1,937	1,935	1,932	1,930	1,927	1,925
hystereze č.4	1,925	1,927	1,930	1,932	1,935	1,937	1,935	1,932	1,930	1,927	1,925
hystereze č.5	1,925	1,928	1,930	1,933	1,935	1,937	1,935	1,933	1,930	1,928	1,925

Graf 23 - Srovnání hysterezních křivek průběhu celkové hustoty na vyvozeném tlaku

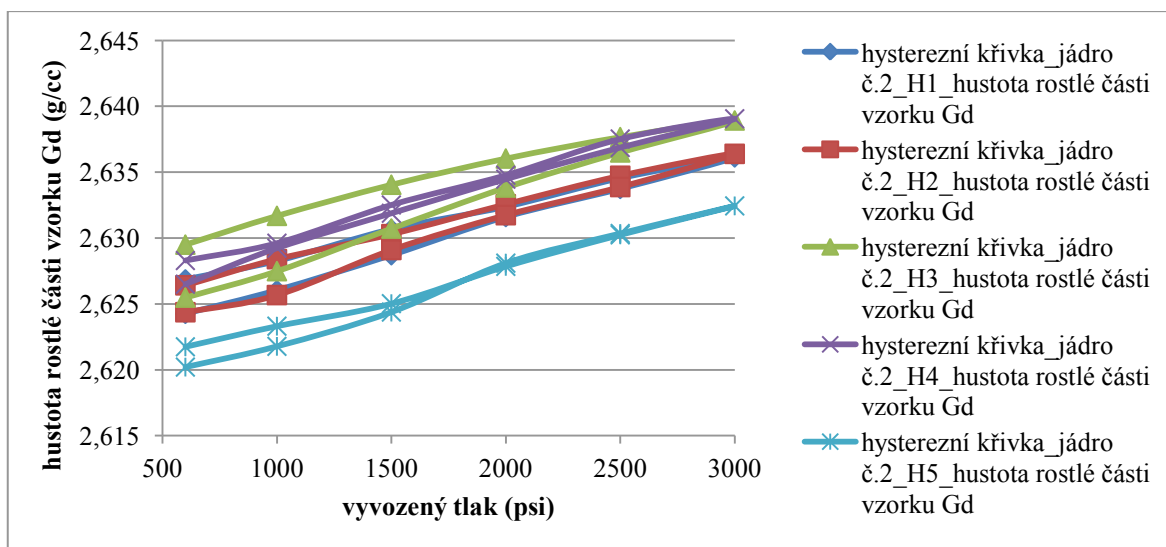


Změny v celkové hustotě rostlé části jsou zaznamenány až na druhém, popř. třetím desetinném místě. Po sérii měření nedošlo téměř k žádným změnám. Křivky mají ideální průběh.

Tabulka 14 - Vývoj hustoty rostlé části G_d v závislosti na vyvozeném tlaku p

tlak p (psi)	600	1000	1500	2000	2500	3000	2500	2000	1500	1000	600
hystereze č.1	2,627	2,628	2,631	2,632	2,635	2,636	2,634	2,632	2,629	2,626	2,624
hystereze č.2	2,626	2,628	2,630	2,633	2,635	2,636	2,634	2,632	2,629	2,626	2,624
hystereze č.3	2,630	2,632	2,634	2,636	2,638	2,639	2,637	2,634	2,631	2,627	2,625
hystereze č.4	2,626	2,629	2,632	2,634	2,637	2,639	2,638	2,635	2,633	2,630	2,628
hystereze č.5	2,622	2,623	2,625	2,628	2,630	2,632	2,630	2,628	2,624	2,622	2,620

Graf 24 - Srovnání hysterezních křivek průběhu hustoty rostlé části na vyvozeném tlaku



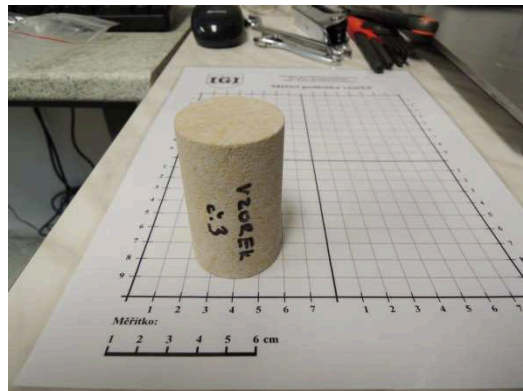
Hustota rostlé části vzorku se během měření pohybuje v rozmezí 2,620 až 2,640 g/cc.

6.5 Stanovení fyzikálně – petrografických parametrů vzorku č. 3

Parametry vzorku č.3:

- průměr $d = 37,5$ mm
- délka $l = 62,0$ mm
- hmotnost $m = 131,43$ g

Při prvním měření jsme stanovili, že vzorek č. 3 bude stlačen na hodnotu 3000 psi (207 bar). Výsledky tohoto měření jsou uvedeny v tabulce č. 3.



Obrázek 22 – Vzorek č.3 (foto L.Bělíčková)

Tabulka 15 - Stanovení parametrů vzorku č.3

stlačení p	propustnost pro vzduch (N_2) $K[mD]$	objem pórů V_p [cc]	pórovitost [%]	objem vzorku V_b [cc]	objem rostlé části vzorku V_g [cc]	hustota vzorku B_d [cc]	hustota rostlé části vzorku G_d [cc]
3000,00	567,13	18,8	27,71	67,86	49,06	1,94	2,68

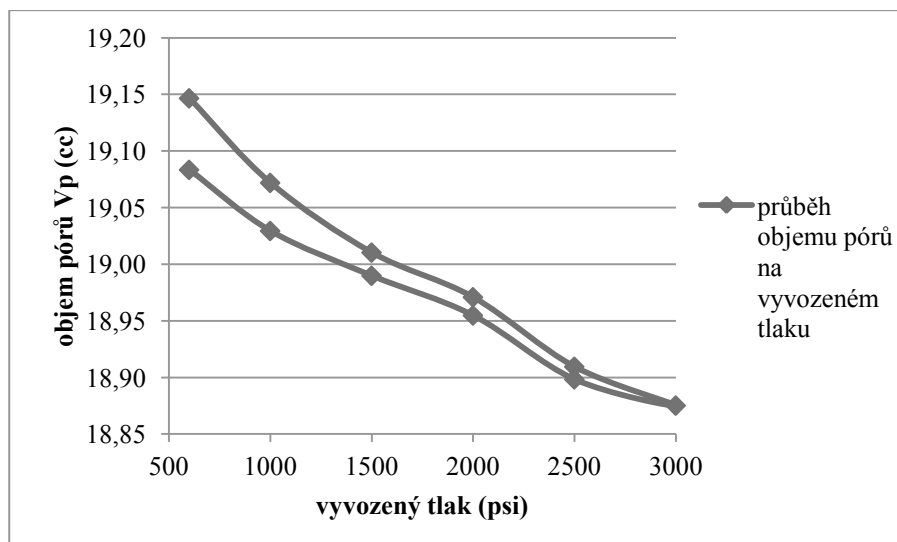
6.5.1 Stanovení hysterezních křivek jádra č.3

Stanovení proběhlo na základě měření daných veličin v tlakovém rozpětí 600 psi – 3000 psi (41 bar – 207 bar).

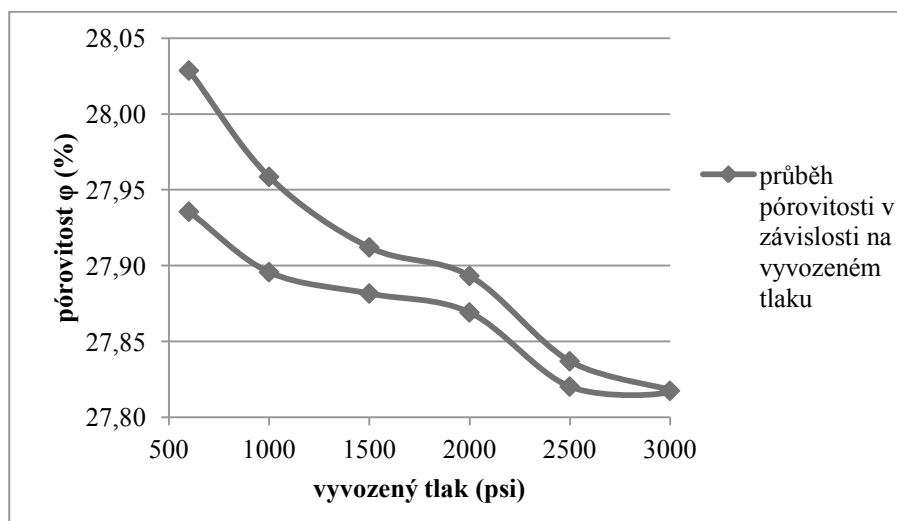
Před prvním měření byla hmotnost jádra č. 3: 131,33 g.

Po sérii měření hmotnost jádra č.3 byla: 131, 29 g.

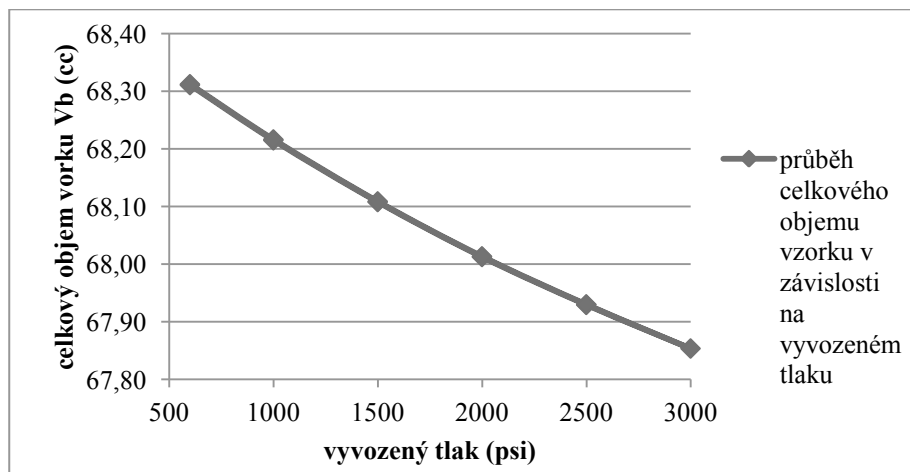
Graf 25 - Hysterezní křivka průběhu objemu pórů na vyvozeném tlaku



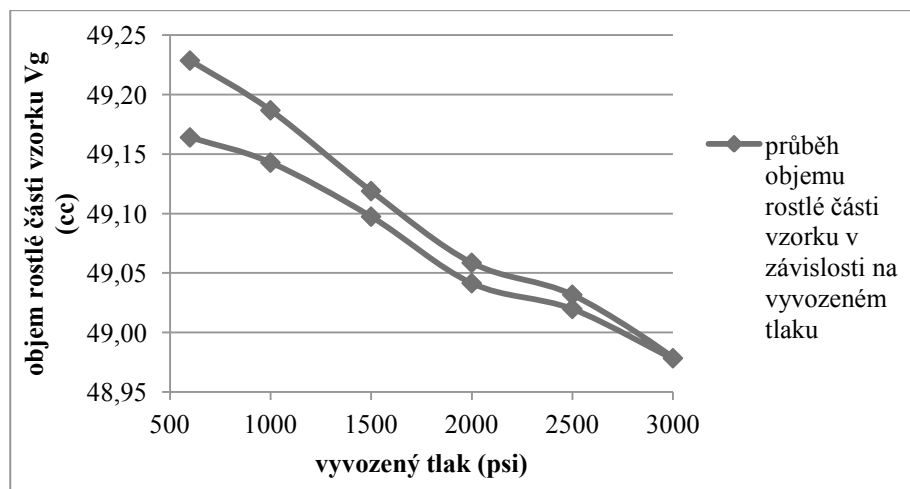
Graf 26 - Hysterezní křivka průběhu pórovitosti na vyvozeném tlaku



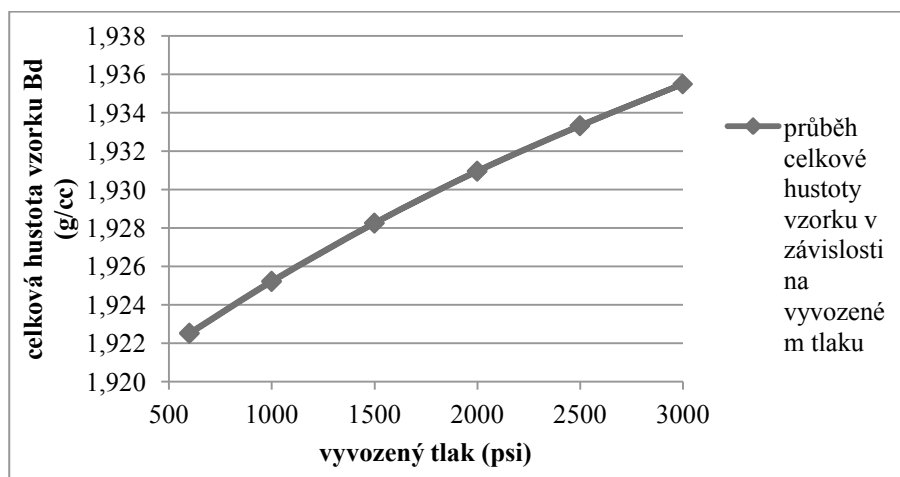
Graf 27 - Hysterezní křivka průběhu celkového objemu na vyvozeném tlaku



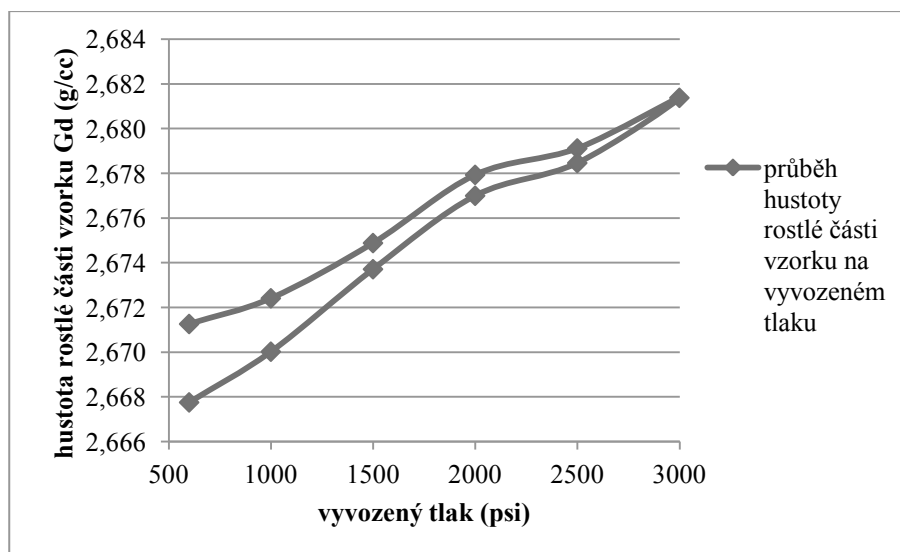
Graf 28 - Hysterezní křivka průběhu objemu rostlé části na vyvozeném tlaku



Graf 29 - Hysterezní křivka průběhu celkové hustoty na vyvozeném tlaku



Graf 30 - Hysterezní křivka průběhu hustoty rostlé části na vyvozeném tlaku

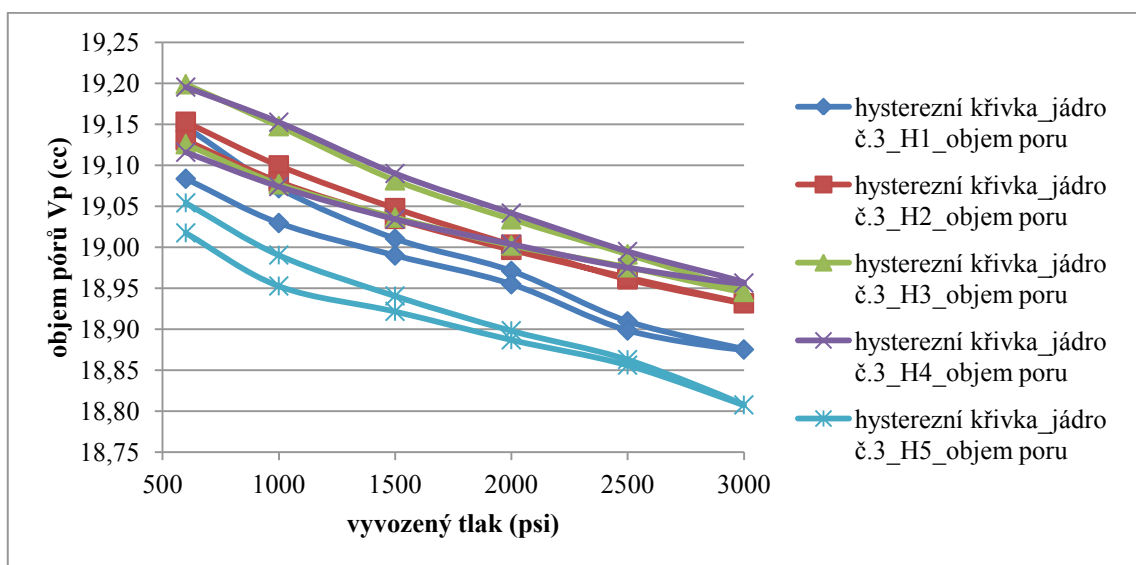


Srovnání hysterezních křivek:

Tabulka 16 - Vývoj objemu pórů V_p v závislosti na vyvozaném tlaku p

tlak p (psi)	600	1000	1500	2000	2500	3000	2500	2000	1500	1000	600
hystereze č.1	19,15	19,07	19,01	18,97	18,91	18,88	18,90	18,95	18,99	19,03	19,08
hystereze č.2	19,15	19,10	19,05	19,00	18,96	18,93	18,96	19,00	19,03	19,08	19,13
hystereze č.3	19,20	19,15	19,08	19,03	18,99	18,95	18,98	19,00	19,04	19,08	19,13
hystereze č.4	19,20	19,15	19,09	19,04	18,99	18,96	18,97	19,00	19,03	19,07	19,12
hystereze č.5	19,05	18,99	18,94	18,90	18,86	18,81	18,86	18,89	18,92	18,95	19,02

Graf 31 - Srovnání hysterezních křivek průběhu objemu pórů na vyvozaném tlaku

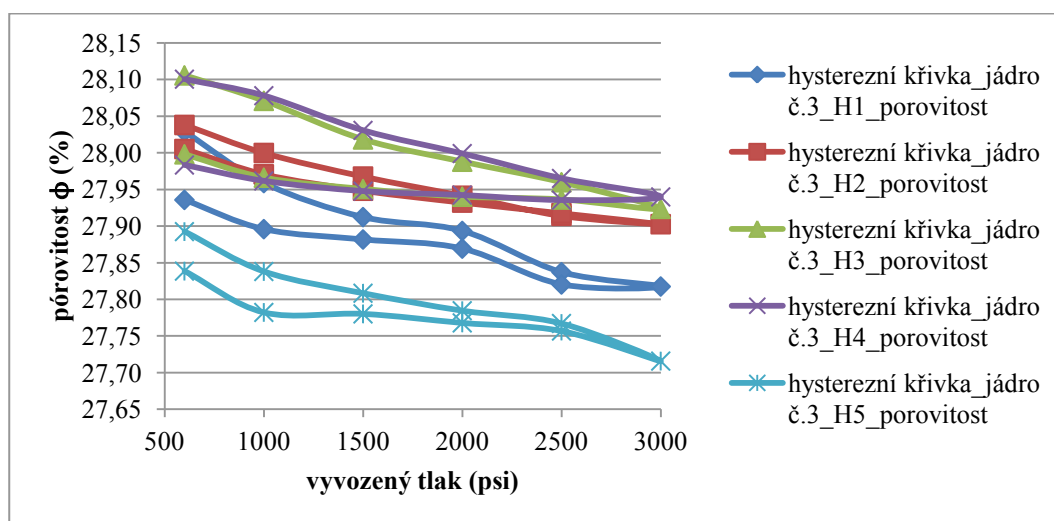


Objem pórů se v průběhu měření nijak zásadně nezměnil.

Tabulka 17 - Vývoj pórovitosti ϕ v závislosti na vyvozaném tlaku p

tlak p (psi)	600	1000	1500	2000	2500	3000	2500	2000	1500	1000	600
hystereze č.1	28,03	27,96	27,91	27,89	27,84	27,82	27,82	27,87	27,88	27,90	27,94
hystereze č.2	28,04	28,00	27,97	27,94	27,91	27,90	27,92	27,93	27,95	27,97	28,01
hystereze č.3	28,11	28,07	28,02	27,99	27,96	27,92	27,94	27,94	27,95	27,97	28,00
hystereze č.4	28,10	28,08	28,03	28,00	27,96	27,94	27,94	27,94	27,95	27,96	27,98
hystereze č.5	27,89	27,84	27,81	27,78	27,77	27,72	27,76	27,77	27,78	27,78	27,84

Graf 32 - Srovnání hysterezních křivek průběhu pórovitosti na vyvozeném tlaku

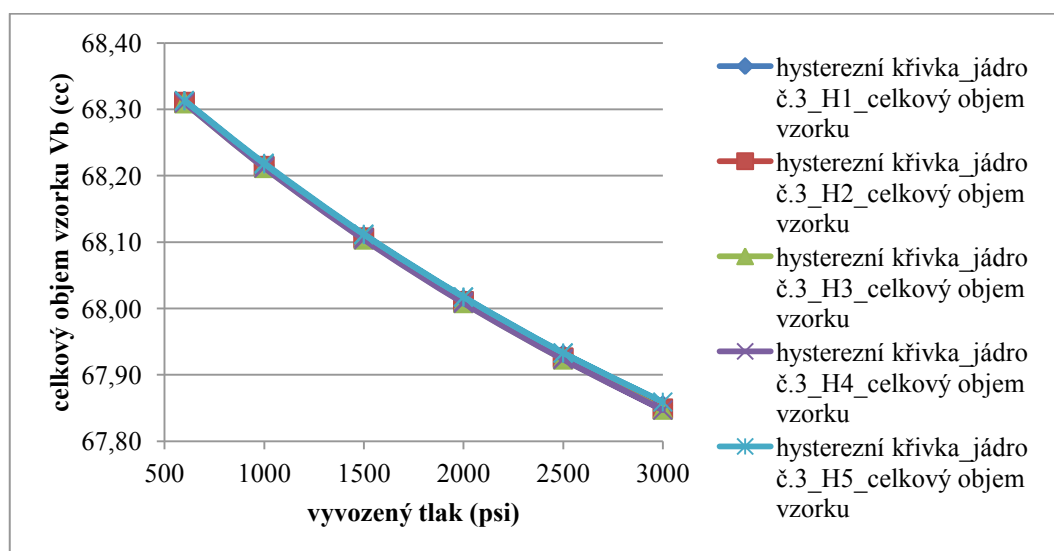


Po sérii měření došlo ke snížení pórovitosti horninového vzorku.

Tabulka 18 - Vývoj celkového objemu V_b v závislosti na vyvozeném tlaku p

tlak p (psi)	600	1000	1500	2000	2500	3000	2500	2000	1500	1000	600
hystereze č.1	68,31	68,21	68,11	68,01	67,93	67,85	67,93	68,01	68,11	68,22	68,31
hystereze č.2	68,31	68,21	68,11	68,01	67,93	67,85	67,93	68,01	68,11	68,21	68,31
hystereze č.3	68,31	68,21	68,10	68,01	67,92	67,85	67,92	68,01	68,11	68,21	68,31
hystereze č.4	68,31	68,21	68,10	68,01	67,92	67,85	67,92	68,01	68,11	68,21	68,31
hystereze č.5	68,31	68,22	68,11	68,02	67,93	67,86	67,93	68,02	68,11	68,22	68,31

Graf 33 - Srovnání hysterezních křivek celkového objemu na vyvozeném tlaku

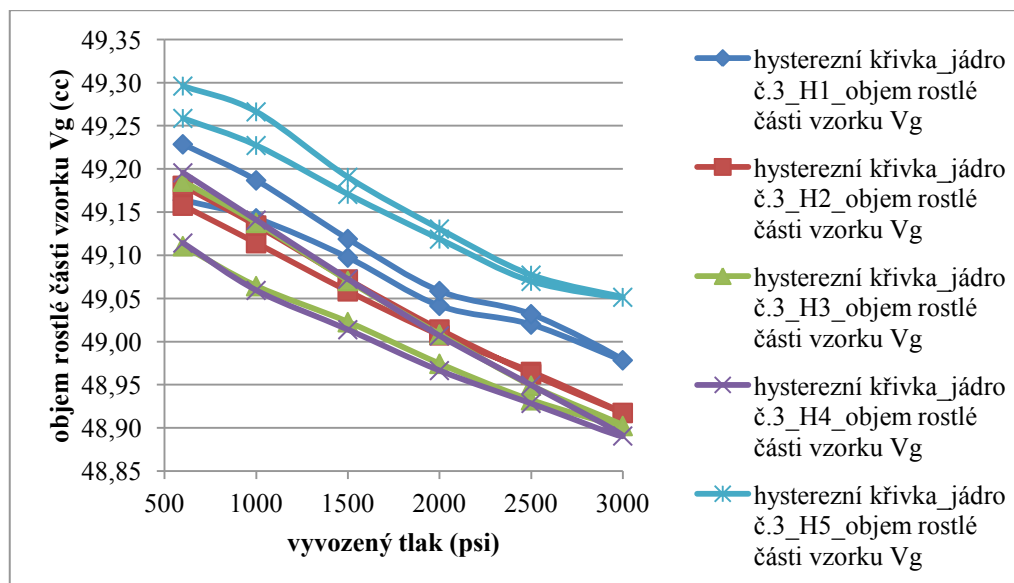


Průběh všech pěti křivek po sérii měření je totožný, nedošlo k žádným změnám v celkovém objemu vzorku.

Tabulka 19 - Vývoj objemu rostlé části V_g v závislosti na vyvozovaném tlaku p

tlak p (psi)	600	1000	1500	2000	2500	3000	2500	2000	1500	1000	600
hystereze č.1	49,16	49,14	49,10	49,04	49,02	48,98	49,03	49,06	49,12	49,19	49,23
hystereze č.2	49,16	49,11	49,06	49,01	48,96	48,92	48,96	49,01	49,07	49,13	49,18
hystereze č.3	49,11	49,06	49,02	48,97	48,93	48,90	48,95	49,01	49,07	49,14	49,19
hystereze č.4	49,11	49,06	49,01	48,97	48,93	48,89	48,95	49,01	49,07	49,14	49,20
hystereze č.5	49,26	49,23	49,17	49,12	49,07	49,05	49,08	49,13	49,19	49,27	49,30

Graf 34 - Srovnání hysterezních křivek průběhu objemu rostlé části na vyvozeném tlaku

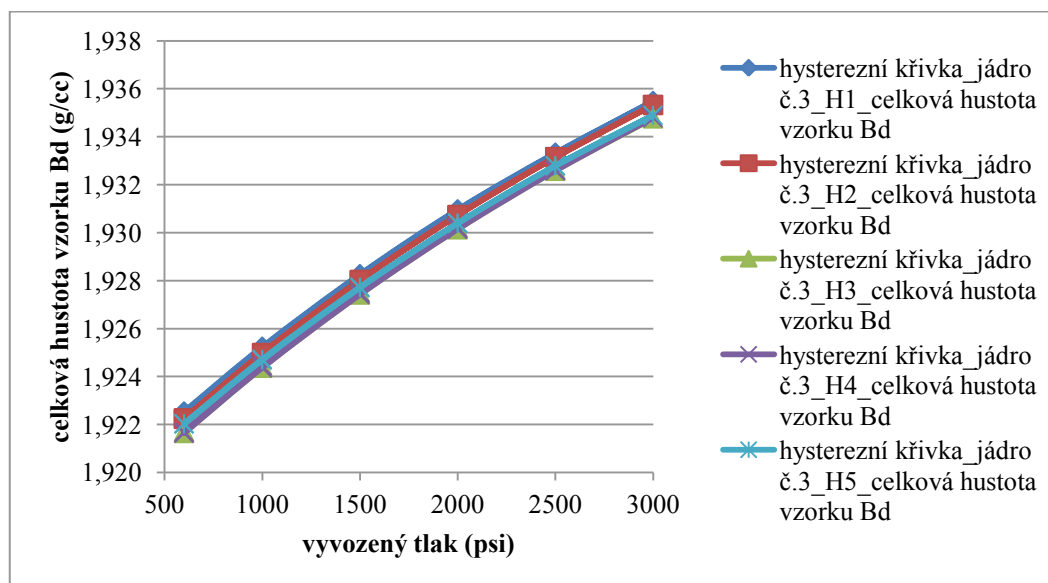


Křivky všech měření jsou tvarově velmi podobné a vykazují podobný průběh, který se liší až v prvních desetinných místech.

Tabulka 20 - Vývoj celkové hustoty B_d v závislosti na vyvozovaném tlaku p

tlak p (psi)	600	1000	1500	2000	2500	3000	2500	2000	1500	1000	600
hystereze č.1	1,923	1,925	1,928	1,931	1,933	1,935	1,933	1,931	1,928	1,925	1,923
hystereze č.2	1,922	1,925	1,928	1,931	1,933	1,935	1,933	1,931	1,928	1,925	1,922
hystereze č.3	1,922	1,924	1,927	1,930	1,933	1,935	1,933	1,930	1,927	1,924	1,922
hystereze č.4	1,922	1,924	1,927	1,930	1,933	1,935	1,933	1,930	1,927	1,924	1,922
hystereze č.5	1,922	1,925	1,928	1,930	1,933	1,935	1,933	1,930	1,928	1,925	1,922

Graf 35 - Srovnání hysterezních křivek průběhu celkové hustoty na vyvozeném tlaku

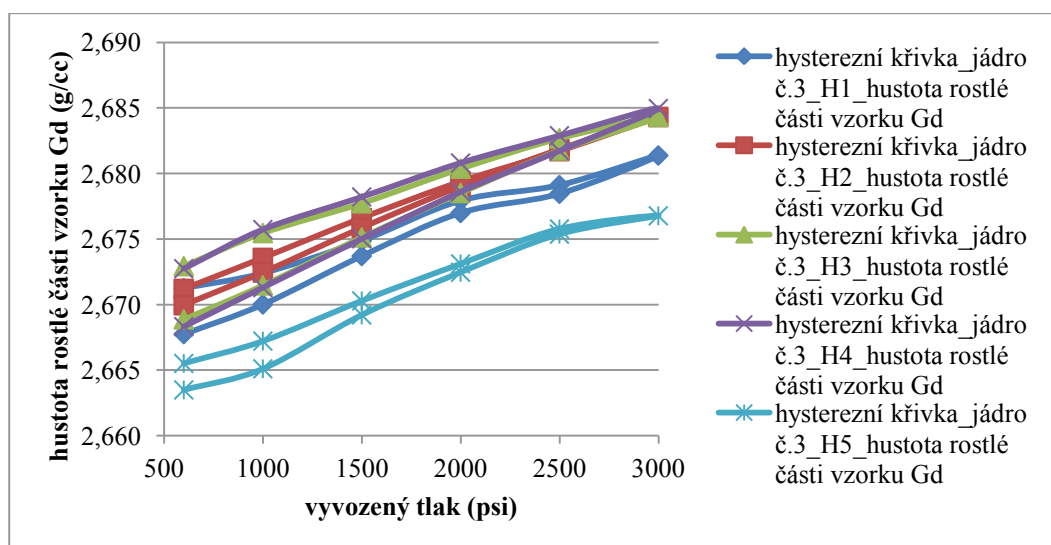


Srovnání průběhu hysterezních křivek celkové hustoty B_d vzorku ukazuje, že nedocházelo k žádným změnám a hodnoty jsou téměř stejné.

Tabulka 21 - Vývoj hustoty rostlé části G_d v závislosti na vyvozovaném tlaku p

tlak p (psi)	600	1000	1500	2000	2500	3000	2500	2000	1500	1000	600
hystereze č.1	2,671	2,672	2,675	2,678	2,679	2,681	2,678	2,677	2,674	2,670	2,668
hystereze č.2	2,671	2,674	2,677	2,679	2,682	2,684	2,682	2,679	2,676	2,672	2,670
hystereze č.3	2,673	2,675	2,678	2,680	2,683	2,684	2,682	2,679	2,675	2,671	2,669
hystereze č.4	2,673	2,676	2,678	2,681	2,683	2,685	2,682	2,679	2,675	2,671	2,668
hystereze č.5	2,666	2,667	2,670	2,673	2,676	2,677	2,675	2,672	2,669	2,665	2,663

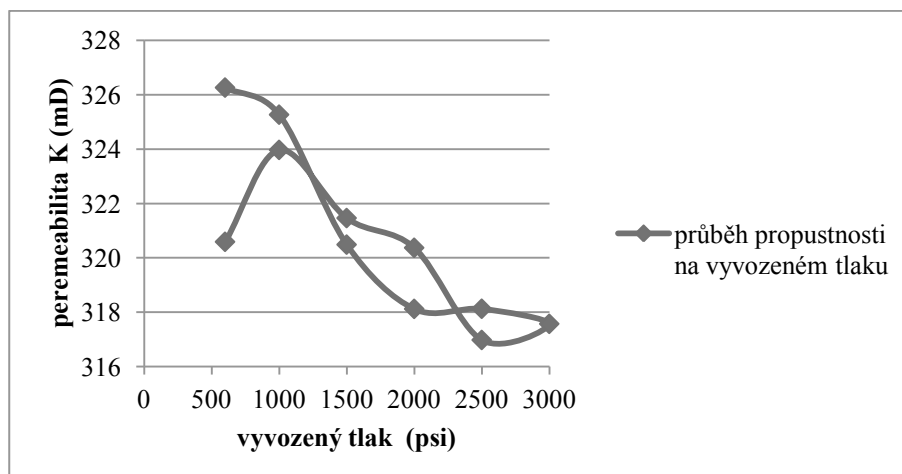
Graf 36 - Srovnání hysterezních křivek průběhu hustoty rostlé části na vyvozeném tlaku



Hustota rostlé části horninového vzorku je vyšší než hustota celého vzorku. Průměrná hodnota hustoty rostlé části G_d je 2,675 g/cc. Změny se objevují až na druhé či třetím desetinném místě.

6.6 Stanovení permeability vzorku č.1

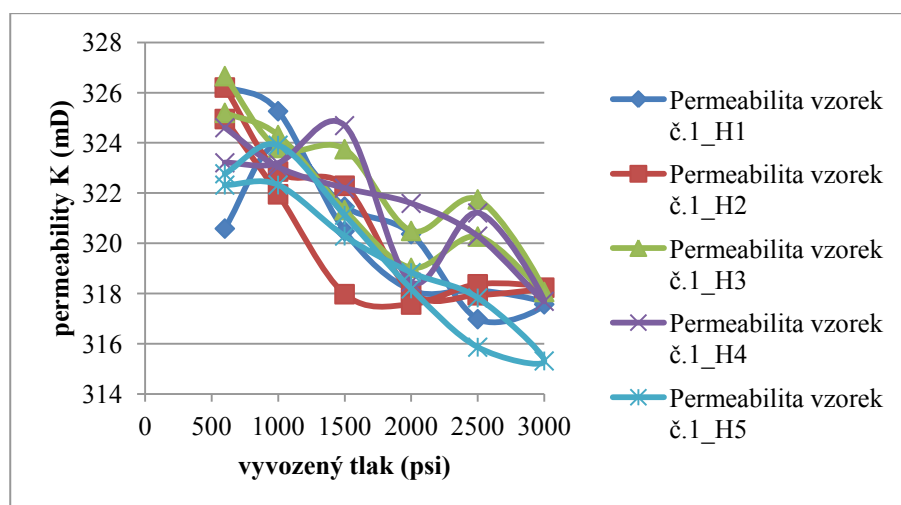
Graf 37 - Průběh propustnosti na vyvozeném tlaku



Tabulka 22 - Vývoj permeability K v závislosti na vyvozeném tlaku p

tlak p (psi)	600	1000	1500	2000	2500	3000	2500	2000	1500	1000	600
hystereze č.1	326	325	320	318	318	318	317	320	321	324	321
hystereze č.2	326	323	322	318	318	318	318	318	318	322	325
hystereze č.3	325	324	321	319	320	318	322	320	324	324	327
hystereze č.4	323	323	325	318	321	318	320	322	322	323	325
hystereze č.5	323	324	321	318	316	315	318	319	320	322	322

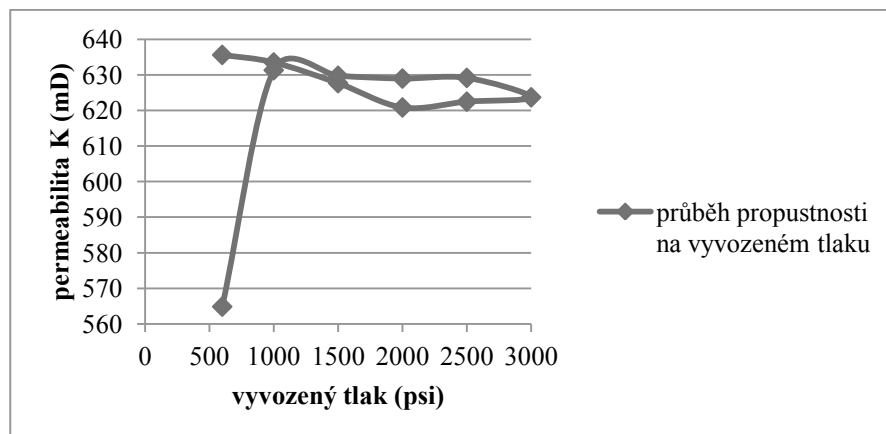
Graf 38 - Srovnání hysterezních křivek permeability v závislosti na vyvozaném tlaku p



Permeabilita vzorku č. 1 se pohybovala v rozmezí 315 až 327 mD. Tyto hodnoty permeability jsou způsobeny nejspíše proběhlými změnami uvnitř vzorku během celého měření.

6.7 Stanovení permeability vzorku č.2

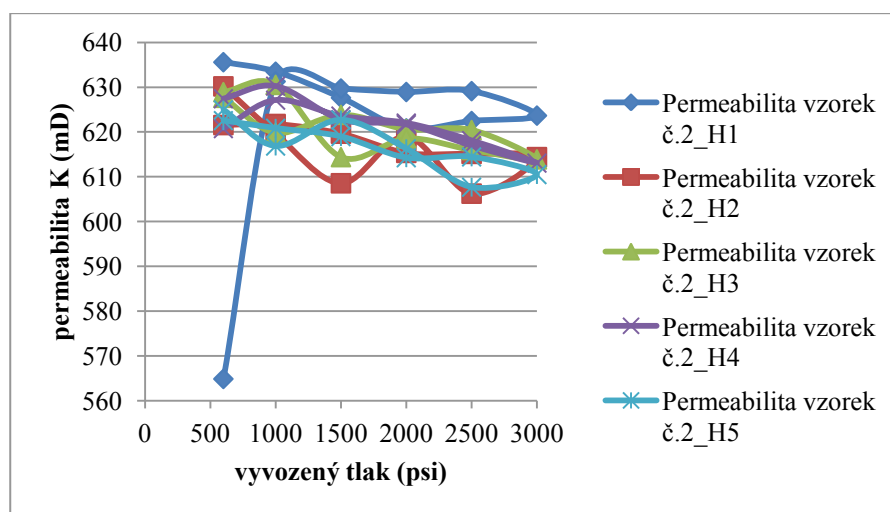
Graf 39 - Průběh propustnosti na vyvozaném tlaku



Tabulka 23 - Vývoj permeability K v závislosti na vyvozaném tlaku p

tlak p (psi)	600	1000	1500	2000	2500	3000	2500	2000	1500	1000	600
hystereze č.1	636	633	628	621	622	624	629	629	630	631	565
hystereze č.2	622	622	620	615	615	614	606	619	609	620	630
hystereze č.3	628	620	624	621	620	614	616	619	614	631	629
hystereze č.4	621	627	624	622	618	613	617	622	623	630	627
hystereze č.5	623	621	619	614	614	610	608	616	623	617	625

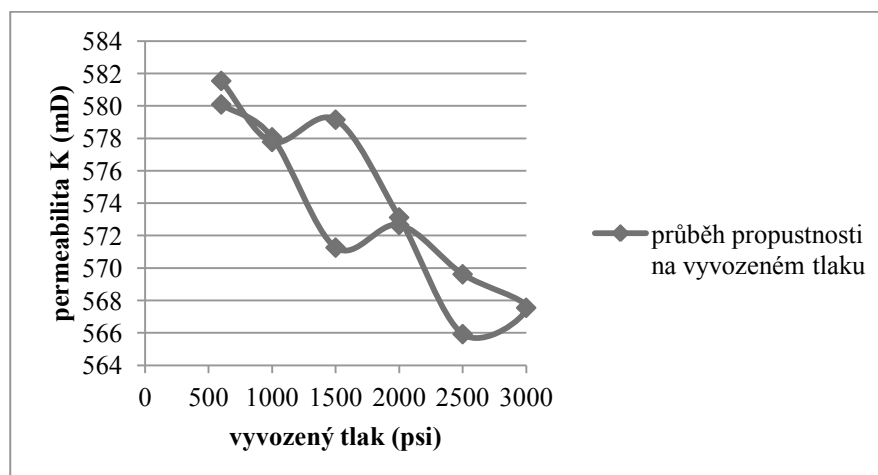
Graf 40 – Srovnání hysterezních křivek permeability v závislosti na vyvozeném tlaku p



V průběhu první hystereze se objevila hodnota 565 mD, což může být způsobeno tím, že došlo k vnitřním změnám vzorku. Poté se už během druhé až páté hystereze permeabilita 2. vzorku pohybovala mezi 606 až 636 mD.

6.8 Stanovení permeability vzorku č. 3

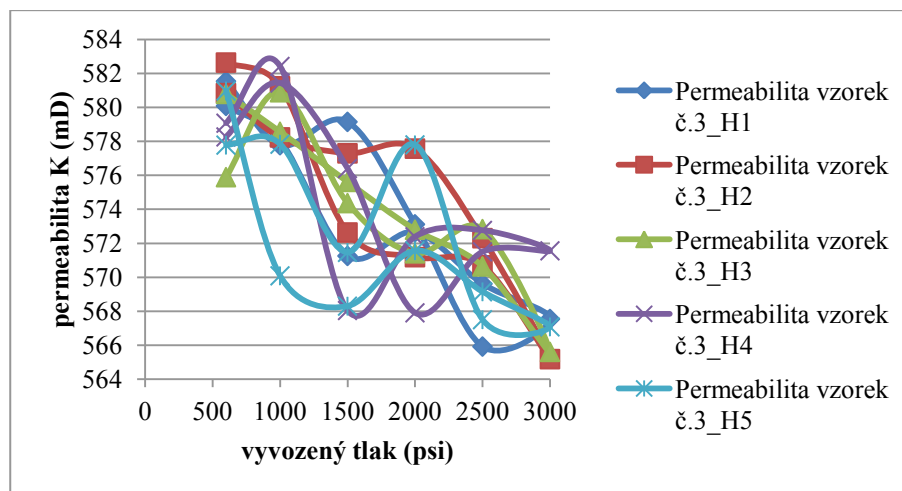
Graf 41 – Průběh propustnosti na vyvozeném tlaku



Tabulka 24 - Vývoj permeability K v závislosti na vyvozeném tlaku p

tlak p (psi)	600	1000	1500	2000	2500	3000	2500	2000	1500	1000	600
hystereze č.1	580	578	571	573	570	568	566	573	579	578	582
hystereze č.2	581	578	577	578	572	565	571	571	573	581	583
hystereze č.3	576	581	574	571	573	566	571	573	576	579	581
hystereze č.4	579	582	568	572	573	572	572	568	576	581	578
hystereze č.5	581	570	568	572	569	567	568	578	571	578	578

Graf 42 – Srovnání hysterezních křivek permeability v závislosti na vyvozaném tlaku p



Podobně jako u předchozích vzorků, ani permeabilita 3. vzorku nebyla konstantní a pohybovala se od 565 do 583 mD. Ani v jednom případě, u všech 3 horninových vzorků permeabilita není stejná, což může být zapříčiněno nehomogenitou horninového masívu, kde byly vzorky odebrány.

6.9 Měření prahového kapilárního tlaku

Zjištění hodnoty prahového kapilárního tlaku proběhlo na desaturatoru.



Obrázek 23 – Desaturator [37]

Desaturator se skládá z konzole pro ovládání tlaku a tlakové nádoby, v níž je umístěna keramická deska. Na desku se nasype vrstva diatomitu, na kterou se následně položí vrtná jádra.

Princip měření spočívá ve zvyšování tlaku v nádobě a sledování úbytku vody v jádrech. Zvyšující se tlak vytěsňuje z pórů

jader vodu, která dále migruje přes diatomit, a skrze keramickou desku ven z tlakové nádoby. Plyn se díky zvýšenému tlaku nedostane do pórů keramické desky z důvodu jejího nasaturování vodou. A povrchové napětí mezi kapalinou a plynem v pórech působí právě proti vstupu plynu do těchto pórů.

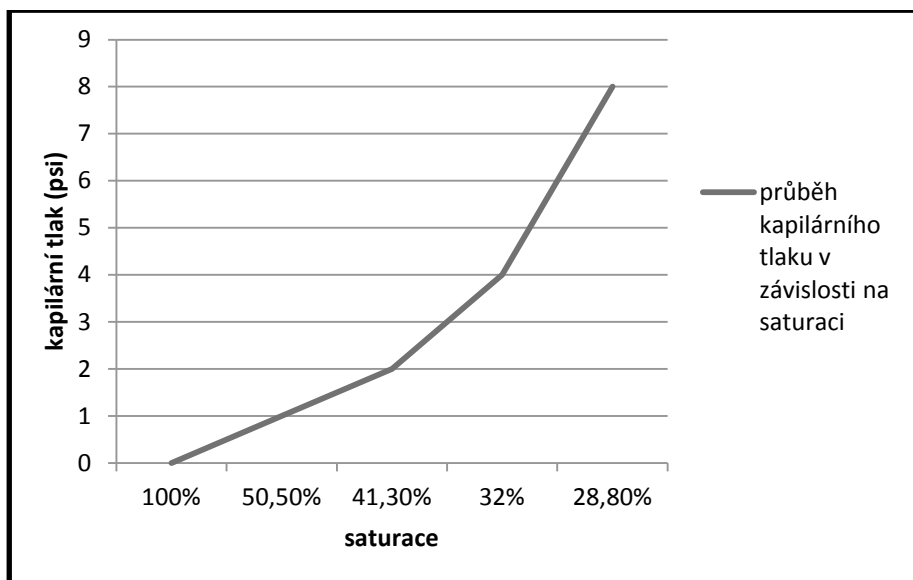
Měření při daném tlaku, konstantním nejméně 48 hodin, spočívá ve zjištění úbytku vody v jádrech. Pro naše horninové vzorky jsme zvolili tyto tlaky: 1, 2, 4 8 psi., tzn. 0,069 bar, 0,138 bar, 0,276 bar, 0,552 bar. Po každém cyklu se nádoba odtlakuje, vzorky se vyjmou a zváží. Poté se hodnoty přepočítají na saturaci a spolu s příslušným kapilárním tlakem je vyneseme do grafu, ze kterého zjišťujeme prahový kapilární tlak pro danou horninu.

Hodnota tlaku, při kterém vzorky začínají desaturovat, odpovídá prahovému kapilárnímu tlaku. Naše vzorky začaly desaturovat ihned při počátečním tlaku 1 psi (graf 43).

6.9.1 Stanovení prahového kapilárního tlaku vzorků

1	hmotnost nasaturovaného vzorku (g)	149.290
2	hmotnost vysušeného vzorku před saturací (g)	137.760
3	hmotnost vzorku po měření (g)	137.748
4	zdánlivá ztráta zrna (2)-(3)	0.012
5	korekce pro solanku (g)	-2.755
6	korekce hmotnosti (4)+(5)=R	-2.743
8	objem pórů =počáteční objem solanky (cm ³)	2.304
9	celkový objem vzorku (cm ³)	69,95
10	pórovitost % (8)/(9)	26.30%
11	ztráta vody (g)	-137.748
12	Nacl (ppm)	20000.000
13	hustota solanky	1.012
14	Gas expansion objem pórů (cc)	2.275

Graf 43 - Průběh kapilárního tlaku v závislosti na saturaci vzorku



7. Závěr

Spotřeba plynu je ovlivňována několika faktory. Proti nárůstu spotřeby zemního plynu působí rozvoj v oblasti obnovitelných zdrojů. Naopak k nárůstu přispívá přechod od méně ekologických druhů energie k zemnímu plynu. Lze tedy předpokládat, že v příštích letech bude docházet ke zvýšené poptávce po zemním plynu a bude zde snaha o to, aby strategické zásoby zemního plynu byly dostačující. To znamená, že bude třeba navyšovat kapacitu stávajících podzemních zásobníků plynu a s tím souvisí i vyhodnocení prahových kapilárních tlaků.

V rámci této diplomové práce bylo úkolem stanovit důležité fyzikálně - petrografické parametry a následně u horninových vzorků určit mechanismy jejich chování při různých tlakových zatíženích. Dále bylo úkolem stanovit na těchto vzorcích propustnost pro plyn. K měření bylo využito laboratorní zařízení Laboratoře simulace vrtů a ložisek uhlovodíků – Automatický porozimetr a permeametr, Desaturator. Výzkum probíhal na horninových vzorcích tzv. hořického pískovce.

I když se jednalo o napohled stejné vzorky, jádra vykazovala odlišné fyzikálně - petrografické výsledky. Při srovnání permeability je rozdíl mezi jádry č. 1 a č. 2 i více než 200 mD. Ani v jednom případě, u všech 3 horninových vzorků permeabilita není stejná, což může být zapříčiněno nehomogenitou horninového masívu, kde byly vzorky odebrány.

Stanovení objemu pórů u vzorku č. 1 a srovnání hysterezních křivek všech pěti měření ukazuje, že uvnitř horninového vzorku došlo ke změnám vnitřní struktury a pravděpodobně i k uvolnění části materiálu, který ve vzorku dále migroval (graf č. 7). Tím změnil průběh jedné z křivek. Jedná se zde však jen o malou změnu, v řádu desetinného místa. K podobným změnám došlo také u průběhu pórovitosti v závislosti na vyvozeném tlaku. Naopak, hysterezní křivky všech pěti měření celkového objemu jsou téměř totožné. S narůstajícím tlakem se celkový objem zmenšoval, a naopak, při postupném snižování bočního tlaku docházelo k nabírání ztraceného objemu.

Srovnání měření objemu pórů vzorku č. 2 s prvním vzorkem ukazuje téměř totožný průběh křivek. Průměrný objem rostlé části vzorku č. 2 je 50,84 cc. Rozdíl mezi prvním a posledním měřením byl pouze 0,06 g/cc. Změny v celkové hustotě rostlé části jsou zaznamenány až na druhém, příp. třetím desetinném místě. Po sérii měření nedošlo téměř k žádným změnám a hysterezní křivky mají ideální průběh. Hustota rostlé části se pohybuje v rozmezí 2,620 až 2,640 g/cc.

Objem pórů u vzorku č. 3 se nijak zásadně nezměnil. Došlo však ke snížení pórovitosti vzorku po všech pěti měřeních, z hodnoty 28,03 % na 27,84 %. Srovnání průběhu hysterezních křivek celkové hustoty vzorku č. 3 ukazuje, že nedocházelo k žádným významným změnám a hodnoty jsou téměř stejné. Hustota rostlé části vzorku je vyšší než hustota celého vzorku. Průměrná hodnota hustoty rostlé části je 2,675 g/cc.

Výsledek měření tak potvrzuje nehomogenitu horninového prostředí. Pro průzkum podzemních zásobníků plynu při případném navyšování kapacity by bylo vhodné, kdyby se průzkumné vrty jádrovaly v celé délce uskladňovacího prostoru. To by poskytlo lepší pohled na prostředí podzemního zásobníku plynu pro ověření těsnících schopností nadložních vrstev.

Vzhledem k tomu, že námi zvolená vrtná jádra jsou velmi pórovitá, prahový kapilární tlak byl nižší než počáteční tlak, který jsme při měření použili. Hodnota tlaku, při kterém vzorky začínají desaturovat, odpovídá prahovému kapilárnímu tlaku. Naše vzorky začaly desaturovat ihned při počátečním tlaku 1 psi. Tento tlak byl doporučen jako výchozí hodnota, avšak pro velmi propustné vzorky by bylo vhodnější použít nižší tlaky, např. 0,25, 0,5 psi.

Zdroje:

- [1] Aktuálně.cz [online, cit. 1. 3. 2013] Dostupné na <<http://img.aktualne.centrum.cz/23/17/231742m-zasobnik-plynu-tvrdonice.jpg>>
- [2] AL - BAZALI, T. M., et al.: Measurement of the sealing capacity of shale caprocks, prezentováno v roce 2005 na Annual Technical Conference and Exhibition in Dallas, 9-12. 10. [cit. 10. 1. 2013] Dostupné na <<http://www.faculty.engr.utexas.edu/sharma/pdfs/conference/conf-96.pdf>>
- [3] ARCHER, J. S., WALL, C. G.: Fluid saturation: Influence of wettability and capillary pressure, Petroleum Engineering, p. 92 – 93, ISBN 978-0-86010-715-6, Springer Netherlands 1986, [cit. 4.3.2013] Dostupné na <http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-94-010-9601-0_6#>
- [4] BUJOK, P. et al.: Projektování výstavby a provozu podzemních zásobníků plynu (vybrané kapitoly), VŠB – TU Ostrava, 1985.
- [5] Capillary pressure [online, cit. 10. 2. 2013] Dostupné na <http://web.mst.edu/~numbere/cp/chapter%203.htm#_Toc506795444>
- [6] ČAPLA, L. et al.: Rozšíření kapacity a výkonových parametrů PZP Třanovice, Plyn/Gas č. 9, 10/2012, ročník XCII, ISSN 0032-1761.
- [7] Česká technická norma [online, cit. 31. 1. 2013] Dostupné na <http://csnonlinefirmy.unmz.cz/html_nahledy/38/56319/56319_nahled.htm>
- [8] DAISUKE ITO et al.: Measurement of threshold capillary pressure for seal rocks usinf the step-by-step approach and the residual pressure approach, Energy Procedia, 2001, vol.?, no. 4, s. 5211 – 5218 [cit. 10. 1. 2013] Dostupné na <<http://www.sciencedirect.com>>
- [9] EGERMANN, P. et al.: A fast and accurate method to measure threshold capillary pressure of caprocks under representative conditions, SCA 2006-07, představeno na konferenci: International Symposium of the Society of Core Analysts, Trondheim, 12 – 16.9 2006. Dostupné na <http://www.scaweb.org/assets/papres/2006_papers/SCA2006-07.pdf>

- [10] FÍK, J.: Zemní plyn, str. 59, Agentura ČSTZ, s.r.o., Praha 2006, ISBN 80-86028-22-4
- [11] Fundamental of onshore drilling [online, cit. 2. 1. 2013] Dostupné na <<http://geologie.vsb.cz/DRILLING/drilling/vocabulary.html>>
- [12] Geologická encyklopedie [online, cit. 2. 1. 2013] Dostupné na <<http://www.geology.cz/aplikace/encyklopedie/term.pl?porovitost>>
- [13] HOMOLA, V.: Základy geologie ložisek ropy, plynu a podzemních zásobníků plynu, Severomoravské plynárny k. p., Ostrava 1984.
- [14] HOMOLA, V.: Základy hydrogeologie a geologie ložisek uhlovodíků, VŠB – TU Ostrava 1980.
- [15] Intragaz [online, cit. 1. 3. 2013] Dostupné na <http://www.intragaz.com/en/images/image_1-1-2-2.jpg>
- [16] KAJTÁROVÁ, V.: Modelování odtoku z povodí pomocí Boussinesqovy rovnice, 2008. Dostupné na <<http://www.kvhem.cz/wp-content/uploads/2009/02/Kajtarova.pdf>> [cit. 10. 2. 2013]
- [17] Kapilarita, Encyklopedie fyziky: Reichl, J., Všetická, M., [online, cit. 9. 3. 2013] Dostupné na <<http://fyzika.jreichl.com/main.article/pdf/643-kapilarita>>
- [18] KGE [online, cit. 21. 3. 2013] Dostupné na <<http://www.kge-gasspeichergesellschaft.de/kavernenspeicher+M5d637b1e38d.html>>
- [19] Kohezní práce [online, cit. 13. 2. 2013] Dostupné na <http://vydavatelstvi.vscht.cz/knihy/uid_es-001/hesla/koh<ezni_prace.html>
- [20] LAMICH, D.: Podzemní zásobníky plynu v České republice, Diplomová práce, s. 20 – 21, Ostrava, 2012.
- [21] Materiály k přípravě metodiky měření, nepublikováno, Institut geologického inženýrství, HGF, VŠB – TU Ostrava, 2013.
- [22] Obec Uhřetice [online, cit. 3. 4. 2013] Dostupné na <<http://www.uhrice.cz/soucasnost.php>>
- [23] Petroleum.cz [online, cit. 2. 1. 2013] Dostupné na <<http://www.petroleum.cz/ropa/migrace-akumulace-ropy.aspx>>

- [24] Podzemní voda [online, cit. 13. 2. 2013] Dostupné na <<http://geotech.fce.vutbr.cz/studium/geologie/skripta/podvoda.htm>>
- [25] Povrchové napětí [online, cit. 11. 2. 2013] Dostupné na <<http://artemis.osu.cz/fypx1/Balnar/newpage31.htm>>
- [26] Rtut'ová porosimetrie [online, cit. 17. 3. 2013] Dostupné na <http://vydavatelstvi.vscht.cz/knihy/uid_es-001/hesla/rtutova_porozimetrie.html>
- [27] RWE Gas Storage [online, cit. 22. 11. 2012] Dostupné na <<http://www.rwe-gasstorage.cz/cs/skladovani-plynu/>>
- [28] Sledování kvality vyskladněného zemního plynu na podzemním zásobníku [online, cit. 11. 2. 2013] Dostupné na <http://tresen.vscht.cz/kap/data/studentska_cinnost/obhajoba_semestrálního_projektu_2008/41_sledovani_kvality_vyskladneného_zemního_plynu_na_podzemním_zasobníku_soubor.pdf>
- [29] Smáčivost povrchu vůči kapalinám a druhá viskozita kapalin [online, cit. 11. 2. 2013] Dostupné na <http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=29171>
- [30] Technet.cz [online, cit. 28. 2. 2013] Dostupné na <http://i.idnes.cz/09/011/cl/RJA285672_Dunajovice_3.JPG>
- [31] Techniky a technológie [online, cit. 10. 2. 2013] Dostupné na <http://www.szn.sk/Slovgas/Casopis/2011/6/2011_6_12.pdf>
- [32] Vlastnosti hornin a horninového masivu [cit. 13. 2. 2013] Dostupné na <http://hgf2.unas.cz/vlastnosti_hornin_a_horskeho_masivu.pdf>
- [33] ZÁKOPČAN, M.: Postgraduální a inovační studium: „Průzkum, těžba a uskladňování kapalin a plynů“. Podzemní zásobníky plynu, HGF, VŠB-TU Ostrava, Hodonín 2003.
- [34] Zemní plyn [online, cit. 10. 11. 2012] Dostupné na <<http://www.zemniplyn.cz>>
- [35] Klub přátel hornického muzea v Ostravě [online, cit. 8. 4. 2013] Dostupné na <<http://www.hornickyklub.info/view.php?cislocclanku=2009030017>>

- [36] Elektrotechnika [online, cit. 21. 4. 2013] Dostupné na
<<http://coptel.coptkm.cz/index.php?action=2&doc=6096>>
[37] Research Facilities [online, cit. 22. 4. 2013] Dostupné na
<<http://www.utp.edu.my>>

Seznam obrázků:

Obrázek 1 - Podzemní zásobník plynu [27]	2
Obrázek 2 - Podzemní zásobník plynu - typ porézní [15]	3
Obrázek 3 - Podzemní zásobník plynu - typ aquifer [15]	4
Obrázek 4 - Podzemní zásobník plynu - typ kaverna [18]	5
Obrázek 5 - Mapa podzemních zásobníků plynu v ČR [20]	7
Obrázek 6 – PZP Dolní Dunajovice [30]	11
Obrázek 7 – PZP Háje [35]	12
Obrázek 8 – PZP Lobodice [27]	15
Obrázek 9 – PZP Štramberk [27]	16
Obrázek 10 – PZP Třanovice [27]	17
Obrázek 11 - PZP Tvrdonice [1]	18
Obrázek 12 - Zásoby zemního plynu ve světě, cit.10.11.2012 [34]	21
Obrázek 13 – Smáčivost povrchu podle velikosti smáčecího úhlu [36]	25
Obrázek 14 – Pórovité prostředí [3]	28
Obrázek 15 – Schéma standartní metody [8]	32
Obrázek 16 – Prahový kapilární tlak a rtuťová porozimetrie [9]	34
Obrázek 17 – Schéma zbytkové metody [8]	35
Obrázek 18 – Schéma Automatického porosimetru [21]	37
Obrázek 19 – Schéma permeamtru [21]	38

Obrázek 20 – Vzorek č.1	39
Obrázek 21 – Vzorek č.2	46
Obrázek 22 – Vzorek č.3	54
Obrázek 23 – Desaturator [37]	64